



TITLE:

交通需要面からみた土地利用と道路網の整合性に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

李, 燕

CITATION:

李, 燕. 交通需要面からみた土地利用と道路網の整合性に関する研究. 京都大学, 1994, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1994-11-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3079761>

RIGHT:

交通需要面からみた

土地利用と道路網の整合性に関する研究

1994年8月

李 燕

序

20世紀は人類が自らをとりまく自然と戦い、多くのものを勝ち取った世紀であったと言える。本世紀においては、かつてないスピードで科学技術が進歩し、多くの国は高度な工業化および都市化を達成し、社会の物質的な豊かさはピークに達している。しかし一方、地球規模での資源不足、環境破壊など、人類を含む生命の生存を脅かすさまざまな問題もかつてない深刻さに陥っている。このように、社会経済の発展と環境の調和は来るべき21世紀の第一の課題になると認識されている。

人々の生活に必要な不可欠な交通もその課題に直面している。モータリゼーションの波は先進国だけでなく、世界の至るところで進行している。自家用車の普及率が非常に高い日本や欧米でも、今現在自動車交通手段として普及しつつある中国でも、社会経済の発展にともない、交通需要が年々増えつづけている。しかし、増加をつづける自動車交通需要に対処するため、交通施設を整備するに必要とする資金・空間資源には限度があり、道路容量が需要の増加に追いつかず、交通渋滞が慢性化する傾向にある。その結果、環境破壊や時間的資源の浪費により人々の生活の質の劣化や経済活動の能率の低下がひきおこされている。従来の交通計画に関する研究は交通需要に応じて交通施設を計画・建設するための方法論を構築することが主流であったのに対して、交通需要のマネジメント、言い換えれば、需要と供給の調和が今後研究しなければならない主要な課題と考えられる。

本研究では、中長期的な都市・交通計画における交通需要マネジメントを主たる対象として、交通需要と道路網の整合性の観点から、土地利用計画と交通計画を支援するモデルを検討する。道路網は土地利用の骨格を形成する一方、土地利用の一部分でもあり、両者は相互に作用することによって、都市あるいは地域の面貌を構成する。土地利用／交通システムは複雑な相互作用が存在するシステムであるので、本研究はその全体を対象とするのではなく、道路網に整合する土地利用パターンを求めるモデルの提案およびその現実問題への適用に重点を置いている。提案したモデルの構造および現実問題への適用例に対しては検討・改良を加える余地が少なからず残されているが、本研究の考え方および手法が成長管理や自動車流入制限ゾーンなどの交通需要マネジメント研究の礎となれば幸いに思う。

目 次

本研究の遂行にあたり、多くの方々から貴重なご指導やご援助を賜った。

まず、博士課程の三年余り、終始ご指導とご鞭撻を賜った京都大学工学部飯田恭敬教授に深甚なる謝意を捧げたい。交通工学ならびに交通計画に関する研究の初心者である著者に対して、先生は終始日頃から暖かいご指導とご激励をくださり、その幅広い学際的見識と独創的・先見的発想を学ばせていただくとともに、著者の研究と生活環境に常にご配慮を与えてくださった。先生から学ばせていただいた研究に対する姿勢や方法論は今後研究生活を続けていく上で何よりも貴重な財産になると思う。

また、京都大学工学部内田敬講師、宇野伸宏助手には、日本語の修正や計算機の操作から、研究のディスカッションまで、多くの有益なご教示と適格なアドバイスをいただいた。深く感謝の意を表したい。

さらに、京都大学工学部谷口栄一助教授、中川大助教授、愛媛大学工学部朝倉康夫助教授、大阪府立高等専門学校若林拓史助教授、金沢大学工学部高山純一助教授、(社)システム科学研究所邵春福博士、京都大学工学部吉川耕司助手、倉内文孝助手からも有益なご助言とご協力をいただいた。資料収集にあたっては京都市計画局と(社)システム科学研究所のご協力をいただいた。ここに併せて感謝の意を申し上げたい。また、3年あまりの間、研究生活を共にした京都大学工学部交通土木工学教室交通施設計画研究室の諸兄にも謝意を記したい。

最後に、著者に留学のチャンスを与えてくださった中国国家教育委員会、日本文部省および京都大学天野光三名誉教授、多大なご援助をいただいた(財)綿貫国際奨学財団の綿貫専太郎理事長、そして阪田滉博士ご夫妻をはじめ、著者の勉学を常日頃から励ましてくださった多くの方々に心から感謝の意を表したい。また、基礎的な研究素養をご教示賜り、著者の留学をご支持いただいた南京大学の先生方、華東師範大学都市・地域開発研究センター李春芬教授、厳重敏教授には、末尾ながら、厚く御礼を申し上げたい。

1994年8月

李 燕

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の概要	5
参考文献	7
第2章 土地利用と交通網の整合性	9
2.1 従来の研究	9
2.1.1 土地利用／交通モデルの概要	9
2.1.2 土地利用と交通の記述・予測モデル	12
2.1.3 土地利用と交通の最適化モデル(整合モデル)	13
2.2 本研究の考え方	21
参考文献	25
第3章 道路網に対するOD交通量の最大化	30
3.1 概説	30
3.2 基本的考え方	31
3.3 モデルにおける交通行動の仮説	33
3.3.1 均衡について	33
3.3.2 目的地選択行動	35
3.3.3 経路選択行動	41
3.4 OD交通量の最大化(OD最大化モデル)	46
3.4.1 定式化	46
3.4.2 Stackelberg問題の解の存在性と一意性	48
3.5 数値計算法	50
3.5.1 コンプレックス法	52

3.5.2 計算アルゴリズム	53
3.6 計算例	60
3.7 結語	62
参考文献	63
第4章 一般的な道路網形状に対する整合性の分析	66
4.1 概説	66
4.2 対象道路網の設定	67
4.2.1 対象道路網の形状	68
4.2.2 リンク容量パターンの設定	68
4.2.3 リンク容量パターンと建設費用の関係	69
4.2.4 リンク容量パターンの検討対象範囲	70
4.2.5 OD最大化モデルのパラメータ設定	70
4.3 投資効率による道路網形状の比較分析	71
4.3.1 最大投資効率による分析	71
4.3.2 投資効率の安定性による分析	73
4.3.3 平均トリップ走行時間による分析	74
4.4 道路網形状と最適OD交通量の関係	75
4.4.1 格子状道路網	76
4.4.2 格子放射型道路網	76
4.4.3 格子環状型道路網	78
4.5 結語	80
参考文献	81
第5章 OD最大化モデルの京都市への適用	83
5.1 対象道路網とODデータ	83
5.1.1 対象道路網	84
5.1.2 ODデータ	88
5.1.3 重力モデルのパラメータ	95
5.1.4 ODデータの加工	96

5.2 モデル計算のケース設定	98
5.3 土地利用と道路網の整合性の評価	99
5.3.1 現状道路網	100
5.3.2 将来道路網（土地利用規制がない場合）	102
5.3.3 将来道路網（土地利用規制がある場合）	105
5.4 結語	107
参考文献	109
第6章 土地利用との整合性を考慮した最適道路網計画	110
6.1 概説	110
6.2 最適道路網計画のモデル	111
6.2.1 モデルの定式化	111
6.2.2 計算方法	113
6.3 京都市道路網への適用	115
6.3.1 対象道路網と必要データ	115
6.3.2 最適道路網計画	116
6.3.3 最適発生・集中交通量からみた土地利用誘導方法	117
6.4 結語	119
参考文献	120
第7章 結論	122

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

道路は我々の日常生活における経済活動，社会活動を支える必要不可欠な基盤施設であり，交通を処理する機能だけでなく，土地利用を誘導する機能，都市および地域の骨格を形成する機能，アメニティや安全のための空間を提供する機能などの多くの機能を有している。しかし，交通渋滞が慢性化している今日の道路はアメニティや安全のための空間を提供する機能どころか，交通需要を処理するという基本機能さえ十分に果たしていないことが現状である。さらに，交通渋滞は我々の移動を妨げるだけでなく，生活や環境への悪影響や経済活動の能率の低下などの問題をももたらしている。

交通渋滞対策一般として，どのようなものがあるかについて，米国この分野の専門家集団である米国交通工学会がまとめたマニュアル「渋滞削減のための工具箱」¹⁾を見てみよう。工具箱は，図1-1のように，左側に短期的対策，右側に長期的対策が区分されており，また，箱の上段の方は供給側の対策，下段に需要側の対策が並べられている。また，全体にかかわるものとして制度・財源

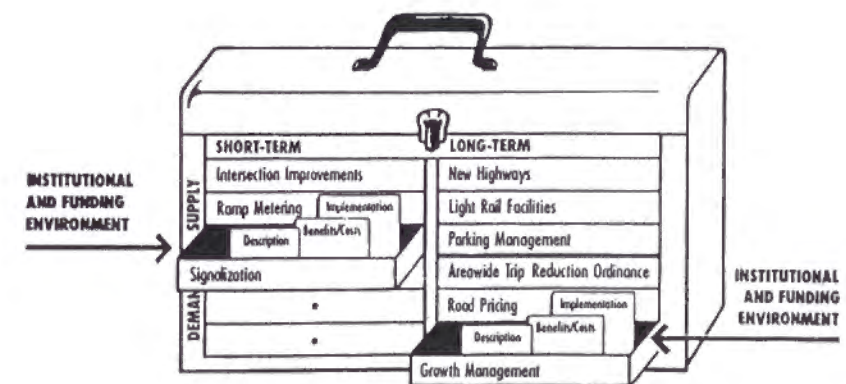


図1-1 渋滞軽減のための工具箱

表1-1 渋滞軽減のための道具箱

の改善があげられており、それぞれの箱には、各道具（対策）の内容、便益費用、執行方法が整理されている。具体的な道具の中身は、表1-1のとおりであり、

①既存システム（道路）の最大活用、②新たな（道路）容量の創出、③公共交通サービスの提供、④交通需要のマネジメント、⑤財源の確保および制度の改善、の5つに大別されている。

①は道路の幅員を増やさずに輸送能力を高める渋滞対策であり、②は既存の道路を拡張または新しい道路を建設することによって道路容量の増加を図る渋滞対策である。③は効率的に旅客輸送を行うための公共交通輸送対策である。④は土地利用管理、カープール等の特定の政策による輸送需要の減少あるいは適正化のための対策である。⑤は前述の渋滞対策を実施する際の財源の確保と交通管理組合等の交通需要マネジメントを支援する制度の確立の重要性を示している。興味深いのは、道具箱の図（図1-1）では、交通需要に対する対策は制度・財源条件に支援されながら進める長期的対策に位置づけられ、具体策として広域トリップ削減条例、ロードプライシング、成長管理が代表施策として例示されていることである。一方、表1-1の④では、相乗り勤務時間の変更といった比較的短期で導入できそうな施策を含めて、数多くの施策が「渋滞回避のための戦略的アプローチ」と「既存渋滞の緩和」という2つに大別されている。さらに、表1-1の⑤の「制度改善」には、交通管理組合、交通マネジメントチーム、広域交通マネジメントがあげられており、交通需要マネジメントを支援するための制度の重要性が示されている。この例から米国においては、交通需要マネジメントは、従来の追随型の交通政策に並んで、重要な対策分野として位置づけられていることが分かる²⁾³⁾。

これは従来の交通需要追随型の交通政策に対して、新たな補完的アプローチを与えるものであるが、移動の自由、特に車によるモビリティを従来最大限尊重してきたアメリカにおいてさえ、交通需要について一定の社会的制約を課すことを許容せざるを得ない状況にあることを示すものとして注目される。また、Mayらの研究から、イギリスにおいても交通需要マネジメントが展開しつつあることが分かる⁴⁾⁵⁾。日本においても、財政問題・環境問題・用地問題などあって、交通需要の規制・誘導が重視されるようになった⁶⁾。交通需要マネジメントは新たな計画概念として確立されつつあることがいえる。

- ① 既存システム（道路）の最大活用
 - ・都市高速道路
 - 高速道路異常検出とマネジメントシステムの導入
 - 高速・一般道路網総合監視制御の実施
 - ドライバー情報システムの導入
 - ランプ出入信号制御の実施
 - 車線追加（既存高速道路用地内）
 - HOV（多人数乗車車両）用施設の整備
 - 将来のテクノロジー
 - ・幹線街路と一般街路
 - スーパー幹線街路の整備
 - 交通信号の改良
 - コンピュータ化された信号システムの導入
 - 幹線街路の監視とマネジメントの実施
 - 交差点の改良
 - Uターン禁止の実施
 - 一方通行路の実施
 - リバーシブルレーンの導入
 - 交通制御機器の改良
 - 駐車マネジメントの実施
 - 物流マネジメントの実施
 - 幹線街路のアクセスマネジメントの実施
 - 幹線街路でのHOV用施設の整備
 - ・取締の強化
- ② 新たな（道路）容量の創出
 - 道路の新設
 - アクセスのコントロールとマネジメントの実施
 - 幾何構造設計
 - 道路改良（Reconstruction）
 - 工事期間中のトラフィックマネジメントの実施
 - 街路の拡張
 - 道路の立体交差の整備
 - 鉄道との立体交差の整備
- ③ 公共交通サービスの提供
 - 鉄道・固定ガイドウェイシステムの建設
 - 急行線バスサービスの導入
 - パトランジットサービスの導入
 - 公共交通サービス提供の実施
 - 公共交通アクセス改善のための土地利用政策
 - 公共交通利用増加のための敷地設計基準
 - 駐車マネジメント戦略による公共交通利用促進策
 - 事業者主導の公共交通利用促進策
- ④ 交通需要のマネジメント
 - ・渋滞回避のための戦略的アプローチ
 - 成長管理
 - ロードプライシング
 - 自動車流入規制ゾーン
 - 駐車マネジメント
 - 交通量最小化のための用地設計
 - 需要マネジメント協定
 - ・既存渋滞の緩和
 - 相乗り
 - 通勤時間の柔軟化
 - トリップ削減条例
- ⑤ 財源の確保および制度の改善
 - ・財源の確保
 - 燃料税の導入
 - 一般歳入からの財源確保
 - 有料道路制度による財源確保
 - 債権の発行による財源確保
 - 官民パートナーシップによる財源確保
 - ・制度の改善
 - 交通管理組合
 - 交通マネジメントチーム
 - 広域交通マネジメント
 - 人材開発

交通需要マネジメントは2つの目的があると考えられる。

(1) 交通需要量の削減。米国連邦道路庁の調査によると、交通需要マネジメントは8~15%の自動車交通量削減効果が推定されており、一部の供給側の改善策より効果が高いとされる。また、主要雇用センターでの事例で20~40%のトリップの削減に成功したケースもあるという⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

(2) 交通需要分布(土地利用)の適正化。つまり、交通網の容量からみれば、交通需要の成長が可能な地域だけに対して、土地利用開発の許可を与え、交通渋滞を引き起こすような地域に対しては、土地利用開発を制限・抑制する。いかにすれば、交通需要を道路網に整合するように誘導することである。成長管理や自動車流入規制ゾーンなどの交通需要管理策はこのためであると考えられる¹⁰⁾¹¹⁾。

しかし、既往の文献のほとんどが政策の報告にとどまっており、具体的に、円滑な交通を営むためには、それぞれのゾーンに対して、交通需要をどれだけ削減したら良いか、成長管理策や自動車流入規制ゾーンなどの交通需要管理策の設定において、どのゾーンの交通需要を削減すべきか、どのゾーンには土地利用開発(交通需要成長)の余裕があるか、その施策内容をデータ分析に基づき、決定する定量的モデルはまだ提案されていないようである。実効性の高い交通需要管理策を実施するためには、技術的な分析方法が不十分であるというのが現状といえる¹¹⁾。

このような背景をふまえ、本研究では、交通需要のODパターンと道路網との整合がとれているならば、その道路網が処理可能なトータルの交通需要は増大し、結果的に都市活力を向上させ、バランスのとれた都市発展につながるという考え方に基づいて、土地利用を道路網に整合させるための交通需要管理策と交通システムの増強計画を支援するモデルを考え、交通需要管理策の施策内容について指針を与えることを目的とする。

なお、本研究での土地利用は、多種多様の用途を含む具体的な土地利用でなく、ゾーンの発生・集中交通量で示される交通需要量からみた土地利用の強度である。これは、ゾーンの発生・集中交通量と土地利用の強度の間に相関関係があるからであり、モデルを簡略化するためである。

1.2 研究の概要

本論文は図1-2のように、7章から構成されている。

第2章では、まず土地利用と道路網の整合性について、従来の研究を整理する。土地利用と道路網の整合性の研究は、従来の土地利用/交通モデルのうち、最適化モデルのひとつに位置づけられる。交通需要と交通施設のどちらが主とするかによって、従来では、1)交通網が与えられた場合、それに整合するOD交通量を求める問題、2)OD交通量(ODパターン)が与えられた場合、最適な道路網を計画する問題、3)OD交通量と道路網の同時最適問題、の3種類に分けられる。これらの問題について従来の取り扱い方について紹介した上で、本研究の特色、具体的な考え方についてさらに説明する。

第3章では、道路網が与えられた場合、それに整合するOD交通量を求めるOD最大化モデルを提案する。このモデルは、従来のODパターン一定とした道路網容量問題と違って、道路網を最も効率的に利用するため、交通需要パターン(ODパターン)も内生的に求められる問題となっているので、このモデルを用いて、交通需要管理、特に成長管理や自動車流入規制ゾーンの量的な指針を与えることができる。

第4章では、OD最大化モデルを用いて、格子型、格子放射型、格子環状型の3つの一般的な道路網形状について、リンク容量パターンの違いによる道路網交通処理能力の変化を比較分析し、また各道路網形状を効率的に利用できるようなOD交通量を明らかにし、現実の道路網計画・土地利用計画に対して方向性を示す。

第5章では、OD最大化モデルの実際の土地利用計画への適用可能性を確認するため、京都市の道路網を簡略化したネットワークについて、数値計算を行い、そして道路網が所与の場合に、OD交通量とネットワークとの整合性の観点から、土地利用計画に対して検討を加える。

第6章では、土地利用との整合性を考慮した場合の最適道路網計画問題について検討する。すなわち、道路網の円滑な状態で処理可能な最大トリップ数を都市の活力を示す1つの指標と考え、一定の建設費用制約の下で、OD交通量の最大化が達成できる道路網の増強モデルを考える。これはOD最大化モデル

と従来の道路網の最適計画モデルとを結合した構造となっている。また、京都市の道路網で簡単な計算例を行い、現実の道路網と土地利用計画への適用可能について検討する。

第7章では、本研究の結びとして、得られた結論をまとめ、さらに今後の研究課題について述べる。

参考文献

- 1) Institute of Transportation Engineers: A Toolbox for Alleviating Traffic Congestion, ITE, 1989.
- 2) 太田勝敏(1992): 交通需要マネージメントの概念と展開－米国的事例を中心として－, 道路交通経済, No. 4, pp. 12-21.
- 3) 毛利雄一(1992): 交通渋滞軽減のための工具箱, 交通工学, Vol. 27, No. 6.
- 4) May A.D. (1991): Integrated transport strategies: a new approach to urban transport policy formulation in the U.K., Transport Reviews, Vol. 11, No. 3, pp. 223-247.
- 5) May A.D., Gardner K.E. (1990): Transport Policy for London in 2001 -The Case for an integrated approach, Transportation 16, pp. 257-277.
- 6) 飯田恭敬(研究代表者, 1993): 都市活動との関連を考慮した交通施設整備のシステム論的評価法, 平成3年度・4年度科学研究費補助金総合研究(A)研究報告書.
- 7) Federal Highway Administration(1990): Evaluation of Travel Demand Management: Measures to Relieve Congestion. U.S.DOT.
- 8) Darnes, L. and Berman, W. (1991): Travel Demand Management: Reducing Capacity Needs, 1991 OECD Makuhari Seminar.

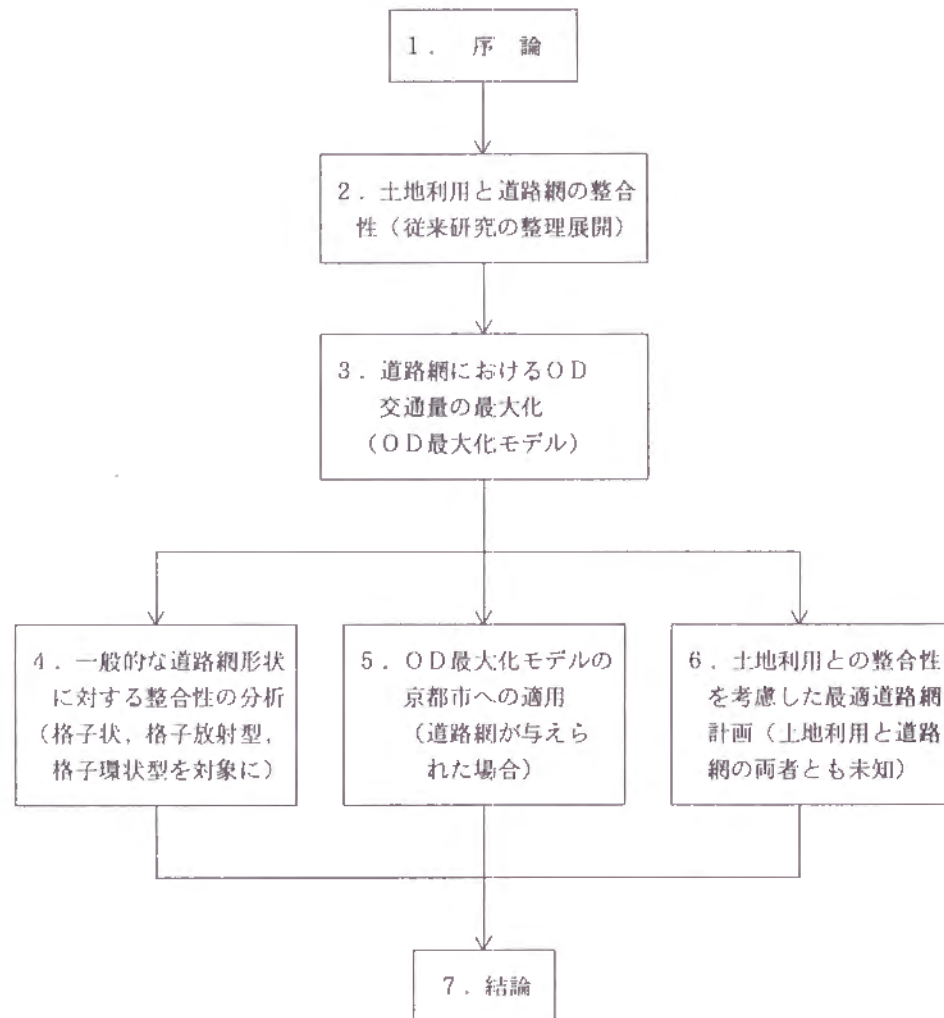


図1-2 研究の手順

- 9) Higgins T.J.(1990): Demand Management in Suburban Settings, Transportation 17, pp.93-116.
- 10) Deakin E.(1989): Land use and transportation planning in response to congestion problems:A Review and Critique,Transportation Research Record 1237.
- 11) Wachs M.(1990): Regulating Traffic by Controlling Land Use -The Southern California experience, Transportation 16, pp.241-256.

第2章 土地利用と交通網の整合性

土地利用と交通ネットワークの整合は、土地利用から生起される交通需要量と交通施設が最もバランスがとれている望ましい状態をいう¹⁾。つまり、交通需要が完全に満たされるとともに、供給側の交通ネットワークも有効に利用されている状態を意味する。土地利用と道路網が整合状態になるように計画することは、従来の土地利用／交通モデルの根本的な目的であると言えよう。本章では、土地利用と道路網の整合に関する研究の、従来の土地利用／交通モデルにおける位置づけを明確にし、さらに本研究の考え方について述べる。

2.1 従来の研究

2.1.1 土地利用／交通モデルの概要

土地利用とは、土地の利用状態であり、言い換えれば、社会経済活動の形態、内容、およびその強度が地表に投影したものの総称である。言うまでもなく、交通も土地利用の1つの要素である。土地利用調査においても、土地利用の用途は、公共用地、商業用地、住宅用地、工業用地、公園、道路、鉄道、未利用地、農地、自然林地、などと分類されており、道路、鉄道などの交通用地が土地利用の1種として含まれている²⁾。

交通は他の土地利用要素を円滑に機能させるために必要不可欠な要素であり、土地利用の要素において特に重要な役割を果たしているのは、周知のことである。従来の土地利用（立地）モデルからみれば、Von Thunenの農業立地論(1826年)、Weberの工業立地論(1909年)、Christaller(1933年)、Losch(1940年)の地域中心地理論、都市経済学の基盤と言われるWingoの土地市場モデル³⁾、Alonsoの付け値理論⁴⁾は、いずれも交通を重要な要素として取り扱っている。

しかし、土地利用モデルは、人口、商業、工業、住宅、都市のあらゆる部門にわたり、膨大な都市システムを対象としているので、具体的な交通ネットワ

ークのパフォーマンスではなく、距離、交通コスト、アクセシビリティ、ポテンシャルなどで交通要因を表すのがほとんどである。

50年代以降、北アメリカ、そして日本、ヨーロッパでは自動車が急速に普及し、交通の発展が経済活動に大きな影響をもたらすことが明らかになった一方、交通渋滞、交通事故といった交通問題も一段と深刻になった。計量化およびコンピュータの発展につれて、交通需要予測理論、交通流理論、ネットワーク構成論などを中心とした交通モデルが土地利用モデルと並行して開発された。

その結果、土地利用へのフィードバックを無視して交通計画を立案することの問題が明らかになり、そこから交通施設整備による土地利用へのインパクトを予測する土地利用モデルが必要となった⁵²⁾。

そこで、70年代から、大規模システムに対応できるような分析・計算技術の発達に伴って、距離、交通コスト、アクセシビリティ、ポテンシャルなどの集計的な指標で交通要因を取り入れるだけでなく、実際の交通ネットワークのフローと土地利用要素との相互作用をも考慮した、いわゆる土地利用／交通モデルが見られるようになった。

従来から非常に多くのモデルが開発されているが、モデルの分類軸として重要であるのは次の3つであると思われる。

(1) モデルの目的

モデルの目的によって、土地利用／交通モデルは、記述モデル(descriptive)、予測モデル(predictive)、最適化モデル(optimization)に分類することができる。

記述モデルとは適切な変数、および変数間のパラメータを用いて土地利用／交通システムの挙動を表現し、土地利用／交通システムの状態を記述するモデルである。予測モデルとはシステムの挙動をシミュレートするかあるいはその挙動を将来外挿することによって、システムの将来の状態を記述するモデルである。最適化モデルは前もって決められている目的基準に合うようにシステムの将来の状態を決定するモデルであり、土地利用と交通システムの整合を目的とするモデルである。

これら3つのモデルは相互に密接な関係がある。記述モデルは予測、最適化モデルの基礎となっている。土地利用／交通システムの状態を記述・予測する

ことはシステムを制御し、最適な方向へと誘導するためである。

(2) 交通ネットワークおよびフローの取扱い方

交通ネットワークを明示的に取り扱うのは土地利用／交通モデルの特徴であり、すべての交通機関を含んだものであることが望ましいが、この場合は、交通機関分担率といったまだ研究課題として多くの問題が残されていることに加え、大量の輸送機関の路線系統や運転間隔等の設定が困難であるため、モデルによって取り扱う交通ネットワークの範囲が違ってくる。すべての交通網を取り入れるモデルは現実の計画をサポートする研究に用いられるが、問題を簡単にするため、ある交通機関、特に道路網に限定するモデルが多い。

リンクにおいて、交通量が多くなると、リンクの走行時間が長くなることは周知である。このようなリンクの挙動を関数で取り扱うのは当然望ましいが、土地利用／交通モデルの設定によって解きにくい場合がある。そこで、リンクの走行時間が交通量にかかわらず変化しない、つまり、混雑を考慮しないと仮定するモデルがある。また、都合によって、利用者が常に走行費用最小のパスを通るという「利用者均衡状態」を仮定するモデルもあるし、利用者が、計画者が望ましいと考える評価基準に従って行動する、いわゆる「システム最適」を仮定するモデルもある。

(3) 土地利用の取扱い方

土地利用には、商業、工業、住宅など多くの要素があり、すべての要素自身が複数の要因で絡み合ったサブシステムであることに加え、それぞれの要素の間でも複雑な相互作用をもっている。現在の段階、要素内部、要素間の相互作用のメカニズムが必ずしも明確になっているとは言えない。また、計算条件からみれば、社会・経済システムを原形とする土地利用システム全体を対象として取り扱うのはまだ不明な点も残っている。このように、研究目的によって、土地利用の要素、および変数の取り方が選択されている。また、土地利用要素を具体的に取り入れるモデルと、土地利用要素の代わりに、その相互作用の結果であるOD交通量を取り上げるモデルもある。前者は記述モデル、予測モデルに適切であるが、後者は最適化モデルに多く用いられる方法である。

2.1.2 土地利用と交通の記述・予測モデル

最初の土地と交通の記述・予測モデルは土地／交通の結合モデル(combined land use and transport model)である。これらのモデルにおいて、交通モデルが必要とする社会・経済インプットが外生的なデータではなく、土地利用モデルによって与えられ、そして逆に、交通モデルから交通の一般化コスト(a generalised cost of transport)を土地利用モデルにフィードバックし、土地利用モデルと交通モデルを結合していることが基本的な特徴である。基本的に、図2-1のような構成をしている⁹⁾。Putmanの研究はその代表的なものである⁷⁾。

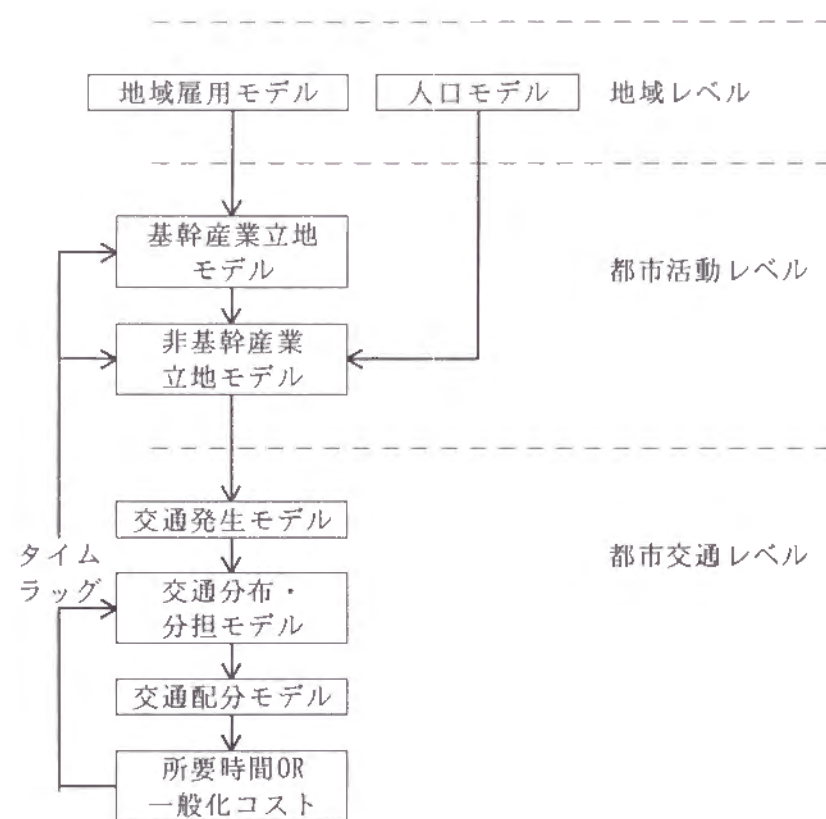


図2-1 土地利用／交通の統合モデル

このようなモデルにおいて、ほとんどの土地利用モデルは交通ネットワークについて一定のパターンを仮定し、将来の土地利用分布の予測に着手している。同様に交通モデルはある人口と活動分布とを与件として受けて、これらの活動の発展の過去の傾向が今後も続くという仮定の下で将来の交通行動を予測して

いる。こうしたアプローチに対する主要な批判は、土地利用と交通施設との間にバランスのとれた開発の可能性が保障されないことである。すなわち、土地需要が立地という行動を経て顕在化し、それが新しい交通需要を生む。次に、その交通需要が既存の交通施設に混雑現象を発生させる。その結果、各活動相互間のアクセスあるいはポテンシャルは混雑による外部不経済を受け悪化する。そしてアクセスの低下が土地利用パターンあるいは活動立地に影響する。したがって、土地利用と交通需要とは一方を固定して他方を予測するのではなく、交通ネットワーク上の混雑効果が活動分布に影響しうるような同時的な予測モデル、つまり土地利用／交通の統合モデル(integrated landuse/transport model)を必要としている⁸⁾。

80年代以来、各国の計画者が都市経済学、都市・地域地理学、交通工学などの最新の理論、方法を用いて、土地利用の多くの要素の相互作用を考慮した記述・予測モデルを開発し、現実の都市を対象とした実証的な研究を行っている(例えば、Mackett⁹⁾)。それと同時に、多くの実務的な土地利用／交通の統合モデルのパッケージおよびその評論も報告されている(例えば、Miller¹⁰⁾)。また、多国の研究者が集まり、ISGLUTI(the International Study Group on Land-Use/Transport Interaction)というグループを作って、土地利用と交通の統合についてモデルを開発し、さらに各国の経験についての比較研究を行っている。ISGLUTIの研究、各モデルの特徴、およびその比較などについてはWebster et al.¹¹⁾、Webster¹²⁾、Paulley & Webster¹³⁾に詳しく述べられている。これらのモデルはほとんど実証的なもので、膨大な枠組みがあるので、ここではその紹介を省略する。

2.1.3 土地利用と交通の最適化モデル(整合モデル)

最適化モデルは前もって決められている目的基準に合うようにシステムの将来の状態を決定するモデルであり、土地利用と交通システムの整合を目的とするモデルである。

土地利用／交通システムにおいて、一般的に言えば、交通は従属的な要素である。なぜなら、交通施設は主として都市あるいは地域の社会経済活動の交通需要を満たすために作られるからである。しかし、交通施設の整備には、資金、

土地、環境などの制約で限界がある。このため、土地利用の交通需要を満足するように交通施設を効率的に作らなければならない。この時、ある既知の交通需要に対して、ネットワークをどのように構築すれば最適（その基準は、例えば建設費用など）であるかを知る必要がある。ここで、この問題を「OD交通量に最適な交通網を求める問題」と呼ぶ。

交通施設は、一旦建設されると、その物理的な容量が固定になり、交通需要の増加に応じて増強していくことは不可能である。また、財政不足、地価高騰、環境問題などの原因で、ハード面で交通施設の交通処理能力をさらにアップさせることが困難になっていることが現実である。このとき、交通需要マネジメントを通じて、土地利用を交通施設が有効に利用できるように誘導する必要がある。したがって、既存の交通ネットワークに対して、どのような土地利用パターンが望ましいかという問題が生じてくる。ここで、この問題を「道路網から最適OD交通量を求める問題」と呼ぶ。

以上のように、OD交通量（ODパターン）と交通ネットワークのどちらか一方を固定し、土地利用と交通施設を整合させるというような方法には限界があることが自明である。交通問題を抜本的に解決するために、長期的視点に立った交通施設と交通需要の同時最適、つまり、交通需要が完全に満たされるとともに、供給側の交通ネットワークも有効に利用されているという望ましい状態へと誘導することが必要である。ここで、このような交通需要と交通施設の両方からの整合を目的としたモデルを「同時最適モデル」と呼ぶ。

次では、これらのモデルについて、従来の基本的な方法論について紹介する。

(1) OD交通分布に最適な交通網を求める問題

OD交通分布に最適な交通網を求めるということは、ある制約条件の下で、与えられた交通需要を満足するために、交通システムの状態がある基準に基づいて最適となるように、ネットワークにおけるリンクの構成を選択決定するという、いわゆる最適交通網計画問題(network design problem)として定式化されている。モデルの計画変数の数学特性、フローの取扱い方の違いで、以下の3つの代表的なモデルがある¹⁴⁾¹⁵⁾。

a) 計画変数が離散の場合

一般に、計画の決定は、いくつかの離散的代替案の中からの選択という形で

行われることが多いので、計画変数は離散変数である場合が多い。このようなモデルの基本構造は、以下のような整数計画問題となる。

$$\min: Z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij}(x) \quad \dots\dots(2.1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{a \in A} l_a x_a \leq L \quad \dots\dots(2.2)$$

$$x_a = 0 \text{ or } 1 \ (a \in A) \quad \dots\dots(2.3)$$

ここに、 Z : ノード i, j 間の最短距離の合計値

d_{ij} : ノード間の最短距離

$x_a = \{x_1, x_2, \dots, x_a, \dots\}$

: 交通網の構成を表し、リンク a が交通網に含まれないとき

$x_a = 0$, 交通網に含まれるとき $x_a = 1$ とする。

l_a : リンク a の長さ

L : 交通網におけるリンクの総延長の制約値

N : ノードの集合

A : リンクの集合

このモデルの基本構造を言い換えると、これはリンク総延長の制約の下で、ノード間の最短距離の合計値を最小にするように、ネットワークを構成するリンクを選択するという簡単な定式化である。

従来、この整数計画問題の解法について多くの論文が発表されているが、そのレビューは、森津¹⁶⁾やMagnanti & Wong¹⁷⁾に詳しい。その厳密解法としては、分枝限定法(branch and bound)の適用およびその改良が主体であって、基本的な方法としては、Scott¹⁸⁾やHoang¹⁹⁾の方法がある。実用的な問題への適用を目的としたヒューリスティックな方法により最適解を求める近似解法においては、Scott¹⁸⁾やBillheimer & Gray²⁰⁾が基本的な方法である。

計画変数を離散変数とする従来の最適交通網計画問題の多くは、与えられたOD交通量をネットワークに割り付ける際、交通混雑、すなわちリンク交通量の増加による所要時間の増加が最適交通網の形状に及ぼす影響を必ずしも考慮しているとは言えず、交通混雑を考慮した最適交通網問題への拡張が必要であるとされてきた。そこで、計画変数を連続変数とした最適計画モデルが開発された。

計画変数を連続変数とした最適計画モデルには、ネットワークフローがシステム最適フローのものと利用者均衡フローのものの2種類がある。

b) 計画変数が連続で、システム最適を仮定した場合

システム最適フローを仮定した最適交通網計画問題は次の非線形最適化問題として定式化できる。

$$\min: \sum_a V_a t_a(V_a, C_a) \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

s. t.

$$\sum_a G_a(C_a) \leq G \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$C_a \geq 0 \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\sum_k h_{kij} = T_{ij} \quad i \in I \quad j \in J \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

$$V_a = \sum_i \sum_j \sum_k \delta_{akij} h_{kij} \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

$$h_{kij} \geq 0 \quad k \in K_{ij}, i \in I, j \in J \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

ここに、

A : 建設・改良対象リンクの集合

a : リンク番号 ($a \in A$)

K_{ij} : ODペア i, j 間のパスの集合

k : パス番号 ($k \in K_{ij}$)

I, J : 発生, 集中ノードの集合

i, j : 発生, 集中ノード番号 ($i \in I, j \in J$)

V_a : リンク a の交通量

C_a : リンク a の交通容量

h_{kij} : ノード i, j 間のパス k の交通量

T_{ij} : ノード i から j へのOD交通量

δ_{akij} : ノード i, j 間のパス k がリンク a を通るとき1そうでなければ0

$t_a(V_a, C_a)$: リンク a の走行時間関数

$G_a(C_a)$: リンク a の建設・改良費用関数

G : 建設・改良費用の上限値

である。

式(2.4)は総走行時間を最小にするという目的関数である。式(2.5)は、ネットワーク全体の建設・改良費用の総和があらかじめ与えられた総建設費用の以下でなければならないという制約条件である。式(2.6)は計画変数であるリンク容量の非負条件である。式(2.7)～式(2.9)は、ODフローの保存条件式、パスフローとリンクフローの関係式およびパスフローの非負条件式であり、ネットワークフローの実行可能性に関する条件である。その解法には、Steenbrink²¹⁾によって提案された分解法の考え方をを用いる方法(例えば、Dantzig et al.²²⁾)と、LeBlanc & Abdulaal²³⁾あるいはHarker & Friesz²⁴⁾が提案したFrank-Wolfe²⁵⁾法の適用による方法がある。その解のアルゴリズムについては、朝倉¹⁴⁾が詳しい。

現象合理性を考慮すると、交通ネットワークフローは、計画変数が与えられたという条件の下でのネットワーク利用者の行動を集計したものでなければならない。システム最適フローを前提とする最適交通網計画問題では、与えられたOD交通量を総走行時間最小化などのシステム最適化基準により、ネットワークに割り付ける方法をとっているため、必ずしも利用者の行動を記述しているとは言えない。その代わりに、利用者均衡フローを用いることは妥当であると思われる。

c) 計画変数が連続で、利用者均衡条件下での最適計画問題

このような最適計画問題は、システム最適フローの最適計画定式化の枠組みを用いて、次のように定式化することができる。

$$\min: \sum_a V_a t_a(V_a, C_a) \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

s. t.

$$\sum_a G_a(C_a) \leq G \quad C_a \geq 0 \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\min \sum_a \int_0^{V_a} t_a(x, C_a) dx \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\sum_k h_{kij} = T_{ij} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

$$V_a = \sum_i \sum_j \sum_k \delta_{akij} h_{kij} \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

$$h_{kij} \geq 0 \quad k \in K, i \in I, j \in J \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

定式化した最適ネットワーク計画問題はStackelberg問題であるから、その一般的な解法（例えば、志水²⁶⁾）を適用すれば、原則的には厳密解を求めることができる。また、大規模交通網に対応するため、ヒューリスティックな方法もいくつか提案されている。その解法のアルゴリズムについて朝倉¹⁴⁾を参考されたい。

(3) 道路網から整合するOD交通量を求める問題

この問題について、従来、以下のように2つのアプローチがなされている。

a) 道路網容量からみた土地利用の立地配分

道路網容量は、一般に特定条件下においてネットワーク全体として受け入れ可能な最大交通量を意味する。その特定条件として物理的、経済的、環境的な限界条件を設定することにより、それぞれネットワークの物理容量、経済容量、環境容量などが設定できる。道路網の容量は、その上を流れるフローの性質およびODパターンにより変化する。ODパターンの扱い方は、単位OD表が固定した場合、目的地選択確率が固定した場合の2種類がある。フローの扱い方は、大きく分けてシステム最適流（混雑なし）と利用者均衡流（混雑あり）がある。道路網容量の計算方法はフローの取扱い方とODパターンの与え方によって異なり、主に3つの方法、つまり、線形計画法²⁷⁾²⁸⁾、カット法²⁹⁾、フロー配分シミュレーション法³⁰⁾³¹⁾がある。各種道路網容量の定式化およびそのレビューは柏谷³²⁾に詳しい。

道路網容量の概念を用いて、土地利用の立地を配分するという発想は極めて簡単である。道路網容量の計算を通して、すべてのリンクが最大限に利用されるまで、どこでどれだけの発生・集中交通量が増やせるかを知ることができる。清田・高田・橋木³³⁾は目的地選択確率が与えられた場合、混雑を考慮しない場合の道路網容量の概念を用いて、道路網がいっぱいになるまで各ゾーンの発生交通量の増加数、つまり、道路網として許容する各ゾーンの開発の規模をLP問題として求めた。樹谷・斉藤³⁴⁾はまずカット法を用いて立地対象とする各ゾーンの立地可能量の上限値を求め、そして、新規の土地利用活動の立地配分が実現可能であるための必要十分条件としての多重カット条件の作成手法を線形計画問題を基礎に考察した。朝倉の研究³⁵⁾はフロー配分シミュレーション法を用いた、都市内ゾーンの活動容量に関する実証的研究である。

b) 交通網から整合する土地利用を求めるシミュレーションモデル

シミュレーションの方法を用いて、所与道路網に対する運用面からみた最適な土地利用パターンを考察する最初の研究は飯田・平本¹⁾である。以下では、この論文について紹介する。単純分布モデルと、ローリーモデルにより道路網要因を考慮したモデルの2つのモデルが含まれているので、一つずつ紹介する。

単純分布モデルは以下のようである。

① 道路網の形状はまえもって決まっている。

② 道路密度の分布は、中心部から周辺部にいくほど低密度、中心部から周辺部にいくほど高密度、全域均一の3つの分布型に分ける。その中心部から周辺部への密度の勾配は経験的に与えている。

③ 発生交通量と集中交通量はともに周辺部高密度型、中心部高密度型、全域均等密度型の3つの分布型に分ける。このようにOD交通分布は9個のケースがある。その中心部から周辺部への密度の勾配も適当に与える。

④ 各ケースについてのODパターンは、各ゾーンの所与発生密度、集中度およびゾーン間距離から重力モデルでODトリップ確率を求め、これを正規化することによって得る。

⑤ ODパターンと道路網から道路網容量、平均トリップ時間を求め、各ケース間の比較研究を行う。

単純分布モデルにおいて、ODパターンはゾーン間の実際の走行時間ではなく、距離で求められるので、必ずしも利用者の行動を反映しているとはいえない。そこで、ローリーモデルにより道路網要因を考慮したモデルも同研究に提示された。主な点は以下になる。

① 道路網の形状はまえもって決まっている。

② 道路密度の分布は、中心部から周辺部にいくほど低密度、中心部から周辺部にいくほど高密度、全域均一の3つの分布型に分ける。その中心部から周辺部への密度の勾配は経験的に与えている。

③ 発生・集中交通量の分布パターンを与える代わりに、基幹産業の分布パターンを周辺部高密度型、中心部高密度型、全域均等密度型の3つの型で設定し、適当な比率を与える。

④ ゾーンにおける各種活動の土地利用面積の上限値は既知である。

⑤ 目的ゾーンの最大活動数、既存活動数、目的ゾーンへの走行時間によりゾーン間の選択する潜在的確率を表すポテンシャルを用いて、ローリーモデルの係数行列を計算し、各種の立地活動を評価指標として考察する。

この研究の後、道路網信頼性の面から、あるいは道路網の効率（容量／建設費用）の面から、いくつかの道路網パターンといくつかのODパターンとの整合に関する研究が報告されているが（例えば、飯田・若林³⁶⁾、李・飯田³⁷⁾）、飯田・平本¹⁾に類似し、しかもそのレベルを超えた研究はまだ見られていない。これは既存道路網から整合するODパターンを求めるという問題の困難さに理由があると思われる。

(3) 土地利用と交通網の同時最適モデル

土地利用と交通網の同時最適モデルはKoopmans-Beckmann問題の拡張として知られる。Koopmans-Beckmann問題は、N個の地点(location)にN個の経済活動(activity)を立地する場合、 N^2 個の地点と経済活動の組み合わせの中で、立地費用および経済活動間の交通費用が最小になるような組み合わせを求めるという最適立地配分問題である³⁸⁾。前提条件は、各経済活動が各地点に立地した場合の立地費用および各経済活動間の相互作用、つまり交通需要が既知で、しかも空間距離と関係ないということである。

Los³⁹⁾はKoopmans-Beckmann問題の交通需要が距離と関係ないという仮定が現実でないことを指摘し、土地利用と交通の同時最適モデルを提案した。前提条件は以下になる。

① 各経済活動が各地点に立地した場合の立地費用、いわゆる地点費用 (site cost)のマトリクス、および経済活動間の相互作用 (OD) マトリクスが既知である。これは最適立地配分モデルと同じである。

② 最大となるネットワーク、及び各リンクのコストが与えられるものとする。

③ 経済活動ペアの相互作用 (トリップ) は、最短経路を選び、しかも他の経済活動ペアと独立である。言い換えれば、リンクの所要時間は交通量と関係がない、つまりリンクの混雑影響を考慮しない。

以上の仮定のもとで、モデルは、すべての立地活動の地点費用、ネットワークの建設費用、および交通費用、この3者の和を最小にするようなネットワー

クと立地を求める問題として定式化されている。このモデルにおいて、ネットワークが決まっていれば、OD間の所要時間が一定になるので、Koopmans-Beckmannの最適立地配分モデルの拡張になる。

しかし、現実において、経済活動間の相互作用は経済活動の間にもっている固有の関係だけでなく、距離などの空間関係によって変化する性質をもっている。このモデルにおいて、経済活動間の相互作用 (OD) マトリクスが与えられるということおよびリンク混雑を考慮しないことに大きな問題がある。Los⁴⁰⁾は経済活動を需要活動(demand activity)と施設(facility)に分類し、各種の活動間の需要関係を与え、さらに修正されたKoopmans-Beckmann問題を下位問題、システム最適とした道路網最適計画を上位問題とし、「同時最適モデル」を提案した。

2.2 本研究の考え方

2.1.3で紹介したように、従来土地利用と交通網の整合性に関する研究は、主として2つのアプローチがなされている。1つは、制約された建設費用の下で、与えられたOD交通に整合するような交通網を求めるアプローチであり、その基本的な構造は図2-2になる。もう1つのアプローチは逆の構造を取り、交通網が与えられる場合に、最適な土地利用 (OD交通量) を求めるものである (図2-3)。2.1.3では「同時最適」という名前のモデルを紹介したが、OD間マトリクスが与えられているので、その基本的な構造は図2-2のアプローチと変わりがないと思われる。

これらのモデルにおいて、OD分布から最適交通網を求めるモデルではもちろん、どのモデルでもOD交通量 (あるいはODパターン) が与えられることを前提としている。しかし、OD交通量が与えられているということは、交通網の計画時点における将来のOD交通量が何らかの方法により知られており、交通網の整備、改良が実行されても、あらかじめ与えられたOD分布パターンは変化しないと仮定していることに他ならない。

一般に、将来のOD分布交通量の予測値を得るためには、土地利用指標などの関数として得られる各ゾーンの発生・集中交通量と将来のゾーン間の交通サ

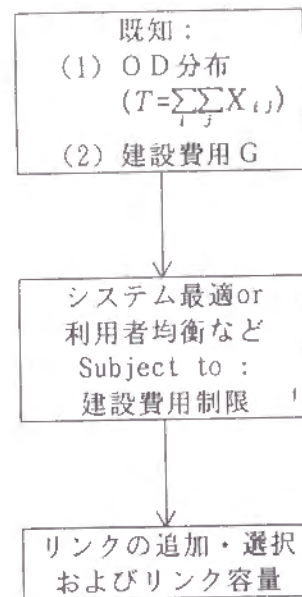


図2-2 従来の整合研究（その1）

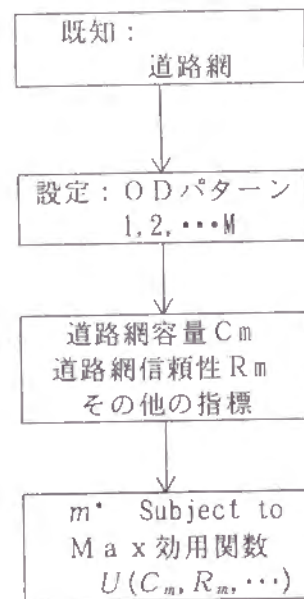


図2-3 従来の整合研究（その2）

ービス水準（最も単純に言えば、ゾーン間所要時間）の予測値が必要である。将来の交通網を求めようとする最適計画問題において、最適交通網が決まる前にそのサービス状態が先に分かってOD分布交通量が決められるのが問題である。

また、あらかじめ与えられたOD分布パターンが変化しないという仮定は、交通需要成長管理や自動車流出入ゾーンなどの交通需要管理策によって交通問題が緩和できることを考慮しないことになる。しかし、財政不足、地価高騰、環境問題に直面している現在、交通網を増強するというハード面の政策だけでなく、土地利用を交通網が有効に利用できるように誘導することも必要である。したがって、OD分布が内生的に決定するようなモデルが必要となってくる。

OD分布交通量を内生的に決定しようとする研究はいくつか報告されている。Lunqvist⁴¹⁾やLos⁴²⁾による交通網と土地利用の同時最適化モデルにおいて、ODフローの内生化が試みられているが、OD分布パターンが外生的に取り扱われているので、フローが内生化になっているとは言えない。朝倉⁴²⁾は、利用者均衡条件下での最適計画問題の枠組みを用いて、需要固定型の利用者均衡問題

の代わりに需要変動型の利用者均衡問題を設定し、ゾーンの発生・集中交通量が与えられた場合の交通網最適計画問題を提案したが、そのモデルにおいて、ゾーンの発生・集中交通量が与えられているので、フローが完全に内生化されたとも言えない。

土地利用と交通網の整合関係を求めるモデルは、以下のことを含むべきであると思われる。

まず、交通網は交通需要を完全に満たすことができる。これは言うまでもなく、交通ネットワークはあくまでも交通需要を満たすために作られるからである。

次に、その交通網は最小の費用である。つまり、交通網が経済的に作られている。交通網の経済性条件がなければ、交通網に関するほとんどの研究は必要がなくなるであろう。

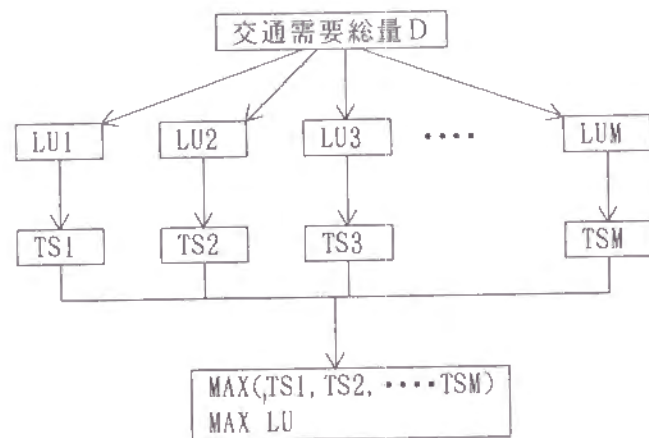
そして、OD交通需要が交通網を最も有効に利用できる分布となることである。すなわち、交通需要は交通網上、バランス良く分布することである。簡単のために、ここでは、「道路網を最も有効に利用できるOD交通需要分布」は「与えられた道路網に対して受け入れ可能な最大OD需要分布」の意味として解釈する。

以上の土地利用／交通の整合問題を一言にすると、これは、「ある建設費用の下で、最大となるOD交通量が出現できるようなネットワークを求める」という問題になる。

しかし、この問題において、OD分布およびネットワークの両方が固定せず、多くの変数（例えば、ノードの個数、位置、リンクの本数および容量、ODパターン）が存在するので、数理的な方法を用いて解くことはきわめて困難である。したがって、ネットワークとOD需要のいずれか一方を固定したうえで、もう一方の最適化を求める方法が考えられる。具体的には、次の2通りある。

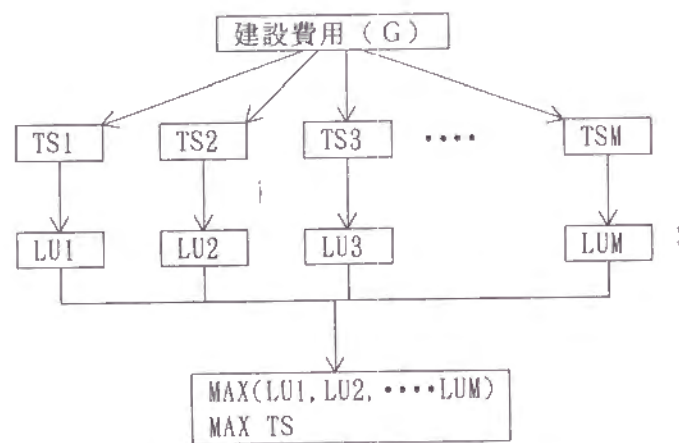
方法1 交通需要の総量が一定値であるすべてのOD交通量を先に固定し、それぞれのOD交通量について整合したネットワークを求める。これらのすべての可能なネットワークについて総合評価を行うことによって、ネットワークとOD需要の整合問題の大域的な最適解を求める（図2-4）。

方法2 建設費用が一定値であるすべてのネットワークを先に固定し、それ



(TS: TRANSPORTATION SYSTEM; LU: LAND USE)

図2-4 整合問題方法1



(TS: TRANSPORTATION SYSTEM; LU: LAND USE)

図2-5 整合問題方法2

それぞれのネットワークについて整合したOD交通量を求める。そして、すべての可能なOD分布について総合評価を行うということによって、ネットワークとOD需要の整合問題の大域的な最適解を求める(図2-5)。

ここで、方法1では、交通需要分布が分かっているならば、それに整合したネットワークを求めるには、2.1.3の(1)で紹介したモデルを応用すればよいが、このとき、建設可能な最大の交通網を前もって与えなければならないので、その

最大の交通網の与え方が問題となってくる。一方方法2では、与えられた道路網に対して整合したOD交通量を求めるモデルの開発が必要である。

しかし、交通需要総量が一定であるOD分布、あるいは建設費用が一定である道路網を列挙する、あるいはシナリオを作ることはいずれも膨大な作業を要する。したがって、以上のような方法は一般的な道路網形状あるいは典型的なOD分布の場合のみ応用することが可能である。

本研究では、与えられた道路網に対して整合したOD交通量を求めるモデル(OD最大化モデル)を開発し(第3章)、方法2を用いて一般的な道路網形状に対して整合分析を行う(第4章)。

実際の都市においては、土地利用と交通ネットワークの基本的な骨格がすでに形成され、大きく変換することができない。このようなことに対して、大域的な最適解を与えるよりも、むしろ次の2つの課題を明らかにすることが重要である。

課題1 既存の道路網あるいは将来の道路網に対して、処理可能な最大交通量はどれだけあるか、道路網と整合するために、既存の土地利用(交通需要)をどのように誘導するか。

課題2 道路網全体の交通容量を増やすために、道路網の増強を行う際、限られた建設費用で最大トリップ数を円滑に処理できる道路網はどうか、さらに今後の土地利用誘導方針をどう決めるか。

課題1については、OD最大化モデルを応用すれば良い(第5章)。課題2については、OD最大化モデルを従来の最適道路網計画モデルと結合させ、ある建設費用の下での最適道路網改良計画および最適OD交通量を明らかにする(第6章)。これらの課題については、その方法論を述べた後、京都市を対象として、その実際都市への適用性を検討する。

参考文献

- 1) 飯田恭敬・平本健二(1979), 道路網計画と土地利用パターンの整合に関する考察, 土木学会論文報告集, 第291号, pp.119-128.

- 2) 横山浩・池田禎男(1988), 新体系土木工学55, 都市計画(1) - 土地利用 -, pp.102-103, 技報堂出版.
- 3) Wingo, L. (1961), Transportation and Urban Land, Resources for the Future inc.
- 4) Alonso, W. (1964), Location and Land Use, Cambridge, Harvard University Press.
- 5) 青山吉隆(1984), 土地利用モデルの歴史と概念. 土木学会論文集, 第347号/IV-1, 1984年7月, pp.19-28.
- 6) Tomas de la barra(1989), Integrated Land Use and Transport Modeling: Decision Chains and Hierarchies, Cambridge Urban and Architectural Studies, Cambridge.
- 7) Putman, S. H. (1975), Urban land use and transportation models: a state of the art summary. Transportation Research, 9, 187-202.
- 8) 天野光三(編, 1982), 計量都市計画: 都市計画システムの手法と応用, 丸善, pp.46-50.
- 9) Mackett, R. L. (1991), LILT and MEPLAN: a comparative analysis of land-use and transport policies for Leeds. Transport Review, Vol. 11, No.2, pp.131-154.
- 10) Miller Jr, H. W. (1990), A theoretical framework for the interactions among models in the integrated transportation and land-use package. Environment and Planning A, Vol. 22, pp.1355-1373.
- 11) Webster, F. V., Bly, P. H., Paulley, N. J. (Editors, 1988), Urban Land-use and Transportation Interaction: Report of the International Study Group on Land-use/Transport interaction(ISGLUTI). Avebury.
- 12) Webster, F. V. (1990), An international study on land-use/transport modelling. PROC of JSCE, No.419/IV-13, pp.1-20.
- 13) Webster, F. V. (1991), Paulley, N. J., Webster, F. V. (1991), Overview of an international study to compare models and evaluate land-use and transport policies. Transport Review, Vol.11, No.3, pp.19-25.
- 14) 朝倉康夫(1987a), 交通ネットワーク均衡を考慮した道路網と土地利用の最適計画モデル. 京都大学学位論文.
- 15) 土木学会土木計画学研究委員会(1985), 土木計画学講習会テキスト, 交通ネットワークの分析と計画: 最新の理論と応用.
- 16) 森津秀夫(1976), 最適交通網構成手法に関する基礎的研究, 京都大学学位論文.
- 17) Magnanti, T. L. & Wong R. T. (1981), Accelerating benders decomposition: algorithmic enhancement and model selection criteria, Operations Research, Vol.29, pp.464-484.
- 18) Scott, A. J. (1969), The optimal network design problem: some computational procedures, Transportation Research, Vol.3, pp.201-210.
- 19) Hoang, H. H. (1982), A computational approach to the selection of an optimal networks. Management Science, Vol.15, pp.488-498.
- 20) Billheimer, J. & Gray, P. (1973), Network design with fixed and variable cost elements, Transportation Science, Vol.7, pp.49-74.
- 21) Steenbrink, P. A. (1974), Transport network optimization in the Dutch integral transportation study, Transportation Research, Vol.8, pp.11-27.
- 22) Dantzig G. B. et al (1979), Formulating and Solving the network design problem by decomposition, Transportation Research, Vol.13B.

- 23) LeBlanc L. & Abdulaal M.(1984), A comparison of user-optimum versus system optimum traffic assignment in transportation network design, *Transportation Research*, Vol.18B, pp.115-121.
- 24) Harker P.T. & Friesz T.L.(1984), Bounding the solution of the continuous equilibrium network design problem, *Proc. of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory in Delft*, VNU Science Press, pp.233-252.
- 25) Frank M. & Wolfe P.(1956), An algorithm for quadratic programming, *Navel Research, Logistics Quarterly*, Vol.13, pp.95-110.
- 26) 志水清孝(1982), 多目的と競争の理論, 共立出版, pp.210-215.
- 27) 三好逸二・山村信吾(1968), 道路網における最大総トリップ数について, 第23回土木学会年次講演会講演集第4部, pp.429-430.
- 28) 榎谷有三(1986), 道路網容量による道路網の感度分析とその応用に関する基礎的研究, 学位論文.
- 29) 西村昂(1987), ネットワーク容量の計画, (土木学会土木計画学研究委員会編:土木計画学講習会テキスト), pp.126-137.
- 30) 飯田恭敬(1972), 道路網の最大容量評価法, 土木学会論文報告集, No. 205, pp.121-129.
- 31) 西村昂(1975), ルート配分法による最大ODフロー問題へのアプローチ, 土木学会論文報告集, No. 242, pp.53-62.
- 32) 柏谷増男(研究代表者, 1992): 道路ネットワークの最大容量から見た都市開発基準の指標化に関する研究, 平成2・3年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp.9-33.

- 33) 清田勝・高田弘・樗木武(1985), 道路網容量から見た土地利用の在り方に関する考察, 土木計画学研究講演集, No.7, 1985年1月, pp.375-380.
- 34) 榎谷有三・斉藤和夫(1987), 道路網容量から見た土地利用活動の立地配分, *交通工学*, Vol.22, No.4, pp.9-20.
- 35) 朝倉康夫(1988), 道路網の最大容量からみた都市内ゾーンの活動許容量に関する実証的研究, 昭和63年度第23回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.385-390.
- 36) 飯田恭敬・若林拓史(1988), ODパターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的考察, *交通工学*, Vol.23, No.3, pp.9-19.
- 37) 李燕・飯田恭敬(1992), 道路網容量からみたODパターンと交通ネットワークの適合性, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, pp.286-287.
- 38) Koopmans T. C. and Beckmann M.(1957) Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica* 25, 53-76.
- 39) Los M.(1978) Simultaneous optimization of land-use and transportation: a synthesis of the quadratic assignment problem and of the optimal network problem. *Regional Science and Urban Economics* 8, 21-42.
- 40) Los M.(1979) A discrete-convex programming approach to the simultaneous optimization of land use and transportation. *Transportation Research*.
- 41) Lundqvist L.(1973): Integrated location-transportation analysis: A decomposition approach, *Regional Science & Urban Economy*, Vol.3, pp.233-262.
- 42) 朝倉康夫(1987b), OD需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル, 土木学会論文集, 第383号/IV-7, pp.93-102.

第3章 道路網に対するOD交通量の最大化

3.1 概説

本章では、与えられた道路網に対して、道路網に整合するようなOD交通量を求めるモデルを提案する。

3.2では、基本的考え方と定式化の前提について述べる。定式化すべき問題は計画主体と交通利用者の2人のプレーヤーとする非協力非ゼロ和2人ゲームのうち、Stackleberg問題と呼ばれる問題であると解釈することができる。すなわち、道路網の計画主体は、交通利用者の行動規範（目的関数および制約条件）に関するすべての情報を持っている。それに対し、道路利用者は計画主体が示す戦略であるノード発生・集中交通量しか分からず、利用者は与えられた戦略のもとで、自己の目的関数を最小あるいは最大にするように行動する。この時、計画主体は利用者の行動を予想しながら、計画主体側の最適戦略を先に決定することができる。

そこで、交通利用者の行動規範の捉え方によって、モデルの定式化および解法が異なるので、3.3では、ミクロ経済学の均衡の理論を用いて、消費者（交通利用者）主体均衡と市場（交通網）均衡の2つのレベルで、交通利用者の目的地選択行動および経路選択行動、そしてその定式化について述べる。交通利用者主体均衡分析の結果、交通利用者の交通需要関数は重力モデル型として定式化することができ、さらに、交通需要関数を用いて目的地選択確率を定式化することができる。経路利用確率については、交通均衡の概念を用いてその定式化および解法を述べる。

3.4では、3.2と3.3で定義した前提の下で、与えられた道路網に対して、道路網に整合するようなOD交通量を求めるモデル（ここでは、「OD最大化モデル」と呼ぶ）を定式化し、その解の存在性と一意性について考察する。3.5では、

OD最大化モデルの解法として、コンプレックス法を用いた数値計算法について紹介する。3.6では、計算例を挙げて、モデルに対する理解を深める。

3.2 基本的考え方

交通流動面から見たネットワークの有効利用をはかるとき、計画主体は交通需要管理策を導入することによって、ゾーンの交通需要量を規制・制御することはできるが、利用者の交通行動に直接的に干渉することができないとする。利用者は与えられたネットワークの下で、各自の行動基準に従って合理的な判断に基づき交通行動を行い、一方、計画主体は利用者の交通行動を予想して、ゾーンの交通需要量の適正化を行うことになる。それゆえ、OD最大化モデルは「利用者の交通行動を記述する、いわゆる最適均衡問題を制約条件とし、OD交通量最大化を目的関数とする計画システム」であり、2レベル最適化問題として定式化できる。その構造は図3-1のように示される。

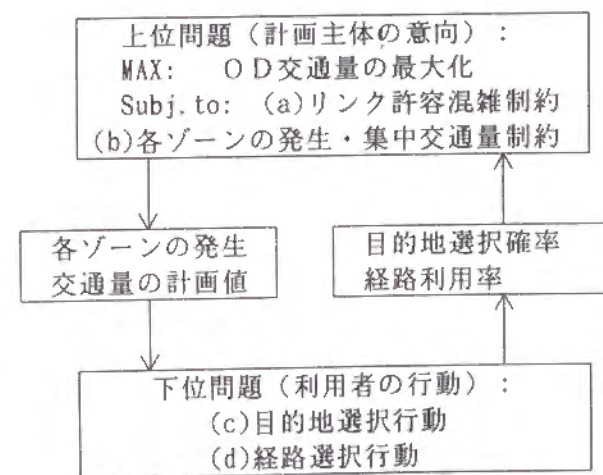


図3-1 OD最大化モデルの概要

ここに定式化すべきモデルをゲーム論的に説明すれば、道路網の計画主体と利用者の集合を2人のプレーヤーとする非協力非ゼロ和2人ゲームのうち、Stackleberg問題¹⁾と呼ばれる問題であると解釈することができる。すなわち、道路網の経営者は、道路利用者の行動規範（目的関数および制約条件）に関す

るすべての情報を持っている。それに対し、道路利用者は計画主体が示す戦略であるノード発生・集中交通量しか分からず、利用者は与えられた戦略のもとで、自己の目的関数を最小あるいは最大にするように行動する。この時、計画主体は利用者の行動を予想しながら、計画主体側の最適戦略を先に決定することができる。

2人のプレーヤーから成る典型的なStackleberg問題は、次のように定式化される。

$$\min_{x \in X} f_1(x, y^*(x)) \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

subject to :

$$g_1(x, y^*(x)) \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

$$f_2(x, y^*(x)) = \min_{y \in Y} f_2(x, y) \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

subject to :

$$g_2(x, y) \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

ここに、

x, y : プレーヤー1, 2の戦略ベクトル

X, Y : 実行可能な戦略ベクトルの集合

$y^*(x)$: x が与えられたという条件の下での下位問題の解

$f_i(x, y)$: プレーヤー i ($i = 1, 2$) の目的関数

$g_i(x, y)$: プレーヤー i ($i = 1, 2$) の制約条件ベクトル

である。

プレーヤー1は、プレーヤー2に関するすべての情報を持っているが、プレーヤー2はプレーヤー1から示される戦略しか分からない。そのとき、プレーヤー1は自己の戦略に対してプレーヤー2が取らるであろう行動を予想して、最適戦略を選ぶことができる。

この問題を道路網の最大OD交通量を求める問題へ対応するとき、プレーヤー1が計画主体、プレーヤー2が利用者となる。計画主体の戦略は各ノードの発生・集中交通量であり、利用者の戦略はネットワークフロー、いかえると、目的地選択行動および経路選択行動を意味する。計画主体は利用者の行動を知っており、そのことを考慮したうえで交通システム全体を最適に運用できるよ

うなノードの発生・集中交通量を決定するのである。

定式化の前提条件は、以下のようにまとめることができる。

① 決定変数は、各ノードの発生・集中交通量である。

② 計画主体の目的関数は、トータル交通量（各ノードの発生交通量の和）を最大にすることである。

③ 各リンクの交通量がある決めた混雑度以下である。その混雑度は事前に与えられる。

④ 各ノードにおける土地利用の容量によって、そのノードの発生・集中交通量の上限値が決められているとする。

⑤ 一般的に、計画主体は地域の活力を維持するため、各ノードの都市活動の最小値を設定している。各ゾーンの発生・集中交通量の下限値はその都市活動の最小値によって決められる。

⑥ 計画主体は利用者の目的地選択行動と経路選択行動に関する情報は知っているが、利用者の行動に干渉することができない。

以上は上位問題の目的関数や計画主体側の制約条件について述べた。前提条件⑥によると、計画主体は利用者の交通行動に対して完全な情報を持っていると仮定しているので、定式化にあたっては、行動基準の扱いによってモデルが変わる。3.3では、行動基準に関する目的地選択行動と経路選択行動について考

3.3 モデルにおける交通行動の仮説

本節では、ミクロ経済学の原理を用いて、消費者（交通利用者）主体均衡と市場（交通網）均衡の2つのレベルで、交通利用者の目的地選択行動および経路選択行動、そしてその定式化について分析する。

3.3.1 均衡について

あらゆる経済現象はお互いに密接な依存関係にあるから、一つの要因に変化があっても、それは必ず他の部分に影響し、絶えず一定の均衡を維持しようとする一般的な傾向がある。例えば、価格は需要と供給との均衡点において定ま

るし、もっとも経済的で、しかも能率的な生産方法をとるためには、生産要素間に適正な均衡関係が維持されなければならない。一定の所得で、もっとも満足度の高い消費生活をするためには、無駄をはぶいて、必要度の高いものから購入する配慮も必要である。生産、消費、価格、所得ないしは雇用などといった一国の経済を図る諸量間の関係についても、同じことがあてはまる。

交通利用者の行動も交通ネットワークのパフォーマンスも例外ではない。交通システムにおいて、利用者は各自の評価基準および予算の下で、どこへ何回トリップするかを決める際には、満足度のもっとも高いトリップの構成を選択する。予算が変化すると、そのトリップの構成も変える。したがって、トリップ間は何らかの均衡関係が保持しようとしている。交通ネットワーク上の交通流を考えてみれば、ある目的地へ結ぶいくつかの経路の中で、もし満足度の高い経路があれば、みんながその経路を選択し、やがて経路が混雑になり、満足度が低下する。このように、交通利用者がもし同じ評価基準をとっていけば、各経路の満足度が同じように均衡すると考えられる。

もちろん、このような均衡が成立するためには、経済主体の合理的な経済活動および完全競争の原理を前提としなければならない。ここで、合理的とは、目的が与えられたとき、目的に適した行動をとるという意味で、一般に、経済主体の目的は企業における利潤、消費者における満足度など、何かを最大化することと仮定される。完全競争とは、プライス・テイカーとして行動する多数の経済主体から成る市場の状況、つまり、個々の家計および企業は市場の均衡価格を所与とみなして行動する状況を意味する²⁾。完全競争の第1の特徴は純粋競争の条件である。すなわち売り手も買い手も多数が存在して競争が激しく、品質が同質的であるために、どの経済主体も市場での価格を所与として行動し、単独では価格を動かす力をもたないことである。第2の特徴は完全摩擦性と完全情報を兼ね備えた完全市場の条件である。

言うまでもなく、経済主体は必ずしもいつでもどこでも合理的な行動を取るとも言えないし、完全競争も現実の市場形態としては希にしか観察されない。そのほか、特に交通といったような巨大なシステムにおいては、合理的な行動と完全競争の条件が完全には満たされないほか、均衡に至るまでのプロセスにおける多数の要因がつねに変化しているので、実際に均衡に達するかどうかは

疑問に思われる³⁾。しかし、本研究で、あえて合理的行動および完全競争を仮定した均衡状態の下で交通利用者の目的地選択行動および経路選択行動を定式化する理由は、そのもとでの経済主体の行動や市場均衡のメカニズムが純粋な理念型として明らかにされれば、経済現象の本質的機能が明確に把握されるからであり、それと対比において競争が不完全な場合の経済主体の行動や市場についても一層深く理解されるからである。物理学において「真空状態」が仮定されなかったならば、多くの物理法則の発見は困難であろう。合理的行動と完全競争の仮定はこの「真空状態」の仮定に喩えられる⁴⁾。

3.3.2 目的地選択行動

次では、消費者（交通利用者）主体均衡の理論に基づいて、交通利用者の交通需要関数を仮定し、目的地選択率の定式化を行う。

(1) 主体均衡の条件

主体均衡論とは、家計（消費者）や企業（生産者）などの経済主体が市場において、財やサービスを供給したり、需要したりする経済行動の仕組みを記述する理論である。これが均衡論と呼ばれるのは、主体行動の仕組みを記述する理論が、経済主体はある予算の下でその利益（あるいは効用）を極大にするよう行動するといういわゆる効用最大化原理に基づいて組み立てられているからである。

以下では、消費者主体均衡の条件を数式で表すことにする。

消費者が消費行動による満足度を効用 U (utility) という、 n 種の消費財の消費量の組 (X_1, X_2, \dots, X_n) とその効用の関係を表す関数を効用関数 (utility function) という。すなわち、

$$U = U(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

である。ここで、 X_i は消費財 i の消費量である。

ある財の消費量を微量 ΔX_i 増やしたときに得られる効用の増加分 ΔU 、すなわち $\partial U / \partial X_i$ を、限界効用 (marginal utility) という。追加的な消費から得られる限界効用が減少していくのは、普遍的に観察される現象であり、これを限界効用逓減の法則 (law of diminishing marginal utility) という。微分を用いれば、この法則は2階の微分係数が負、つまり

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X_i^2} < 0 \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

という形で表される。

消費財 i の価格を p_i とすると、 n 種の消費財の組のコスト C は消費関数

$$C = \sum_i p_i X_i \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

で表すことができる。

消費者が合理的な行動をとるとすると、予算が B である場合の各財の最適消費量はつぎの最適化問題になる。

$$\text{Max } U = U(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

$$\text{subject to } \sum_i p_i X_i \leq B \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

$$X_i \geq 0, \quad p_i > 0, \quad B > 0$$

いまラグランジュ関数を

$$L = U - \lambda (\sum_i p_i X_i - B) \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

とおくとき、最適解はラグランジュ関数を停留させる点、すなわち

$$\frac{\partial U}{\partial X_i} - \lambda p_i = 0 \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

を満足する点である。ここで、 λ はラグランジュ乗数という。

式(3.11)を解くことによって、予算制約のもとで効用を最大化する条件、つまり消費者主体均衡条件として、つぎの式が導かれる。

$$\frac{\partial U / \partial X_1}{p_1} = \frac{\partial U / \partial X_2}{p_2} = \dots = \frac{\partial U / \partial X_n}{p_n} = \lambda \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

すなわち各財の価格に対する限界効用の比は、すべての財を通じて等しくなければならない。そこで、この均衡条件は限界効用均等の法則(law of equi-marginal utility)とも呼ばれる。

(2) 交通需要関数の定式化

消費者主体均衡の概念を用いて、 N 個のゾーンに分けてある地域の交通需要関数を導く。以下の前提条件の下で議論を進める。

- a) 交通利用者がある予算の下で最大の効用を得るように行動する。
- b) すべての交通トリップがゾーンごとに独立的に行われる。つまり目的地

の選択は互いに独立とする。

- c) すべての個人が同じ効用関数を取る。
- d) 交通目的が同じである交通行動を対象とする。
- e) あるゾーンの魅力度はいずれの交通利用者にとっても同じである。

ここで、前提a)b)は消費者主体均衡の前提条件で、c)~e)は交通需要を集計することを簡単化するためである。

まず、ゾーン i の個人 p の交通需要を考えてみる。個人 p にとって、ゾーン j への交通の効用が次のような効用関数で与えられると仮定する。

$$U_{pij} = \alpha_j X_{pij}^{\rho_j} \quad 0 < \rho_j < 1, \quad \alpha_j \geq 0 \quad \dots\dots\dots(3.13)$$

ただし、 i は発ゾーン、 j は着ゾーン、 X_{pij} は個人 p のゾーン i から j へのトリップ数、 α_j 、 ρ_j はゾーン j の特性に関するパラメータである。

いま、パラメータの意味を詳しく説明するために、効用関数を微分して、効用との比率 w_{pij} を見てみる。

$$w_{pij} = dU_{pij} / dX_{pij} / U_{pij} = \rho_j / X_{pij} \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

この式から、単位トリップを追加する時の効用の増加率 (w_{pij}) が ρ_j の関数であることが分かる。この点からみれば、 ρ_j はゾーン j への交通目的に関わるものである。なぜなら、交通目的によって、効用の増加率が違ってくるからである。例えば、連続2回レストランに食事に行くトリップと連続2回デパートへ買物に行くトリップの効用を見てみると、1回目のトリップによって、食事を済ませたので、2回目のトリップは前回より効用がかなり小さくなると思われる。しかし、物は多いほど良いので、2回目の買物トリップの効用は1回目よりそんなに小さくならないと思われる。これは食事トリップの ρ_j は買物トリップの ρ_j より小さいからである。ここで、 $0 < \rho_j < 1$ (式(3.13))としているが、これは一般に消費財が多くなるほど効用が大きいことと、限界効用逓減法則(式(3.6))によるものである。

当然ながら、生きていく上では、食事は買物より必要であるので、それぞれの効用の絶対量が異なる。効用関数式(3.13)によると、 α_j 、 ρ_j が大きくなるほど効用が大きい。この点からみれば、パラメータ α_j と ρ_j の両者がゾーン j の絶対的な満足度あるいは吸引力を決めるものである。したがって、絶対

量からみれば、必ずしも2回目の食事の効用が2回目の買物の効用より小さいとは言えない。しかし、前提条件d)に示したように、本研究では、交通目的が同じである交通行動を対象とする。つまり ρ_j はゾーンによらずに一定で、 $\rho_1=\rho_2=\dots=\rho_n=\rho$ とする。したがって、 α_j がゾーンの相対的な魅力度を表すこととなる。

各ゾーンへのトリップが独立に行われ(前提条件b))、ゾーンiからjへの単位トリップのコストを c_{ij} 、ゾーンiからjへのトリップ数を X_{pij} とすると、ゾーンiからn個の目的地への交通の効用関数および交通コスト関数は次の式になる⁵⁾。

$$U_p = \sum_j \alpha_j X_{pij} \quad i, j=1, 2, \dots, N \quad \dots\dots(3.15)$$

$$C = \sum_j c_{ij} X_{pij} \quad \dots\dots(3.16)$$

限界効用均等の法則(式(3.12))によると、消費者主体均衡の条件は

$$\frac{\partial U_p}{\partial X_{pij}} = \lambda c_{ij} \quad \text{for all } j \quad \dots\dots(3.17)$$

となる。効用関数式(3.15)を代入し、整理すると、jへのトリップ数 X_{pij} は式

$$X_{pij} = \left(\frac{\alpha_j \rho}{\lambda c_{ij}} \right)^{1/(1-\rho)} \quad \dots\dots(3.18)$$

となる。ここで、パラメータを簡単にするために、

$$\gamma = 1/(1-\rho) \quad \dots\dots(3.19)$$

$$B_j = (\alpha_j \rho / \lambda)^\gamma \quad \dots\dots(3.20)$$

とすると、jへのトリップ数は

$$X_{pij} = B_j c_{ij}^{-\gamma} \quad \dots\dots(3.21)$$

になる。ここで、 $0 < \rho < 1$ の条件より、 $\gamma > 1$ である。

前提条件c)によると、iゾーンにいるすべての人(A_i 人とする)が式(3.15)の効用関数を持っているので、iからjへの発生交通量は

$$X_{ij} = A_i X_{pij} = A_i B_j c_{ij}^{-\gamma} \quad \dots\dots(3.22)$$

となる。

この式は従来広く用いられている重力モデルである。さらに、本研究では、 α_j はゾーンの集中交通量 Y_j と式(3.23)のような関係を持ち、単位コストは

交通所要時間あるいは距離 t_{ij} と式(3.24)のような関係をもつとする。

$$\alpha_j = Y_j^\beta \quad \dots\dots(3.23)$$

$$c_{ij} = \nu t_{ij} \quad \dots\dots(3.24)$$

式(3.23)を式(3.20)に代入すると、

$$B_j = Y_j^{\beta\gamma} (\rho / \lambda)^\gamma \quad \dots\dots(3.25)$$

を得る。そして、この式と式(3.24)を式(3.22)に代入すると、交通需要関数は

$$X_{ij} = b A_i Y_j^\beta t_{ij}^{-\gamma} \quad \dots\dots(3.26)$$

$$i, j=1, 2, \dots, N$$

ただし、

$$\gamma = 1/(1-\rho) \quad \dots\dots(3.27)$$

$$\beta = \delta \gamma \quad \dots\dots(3.28)$$

$$b = (\rho / \lambda)^\gamma \cdot \nu^{-\gamma} \quad \dots\dots(3.29)$$

X_{ij} : ゾーンiからゾーンjへの交通量

A_i : ゾーンiの人口

Y_j : ゾーンjの集中交通量、 $Y_j = \sum_i X_{ij}$ がある。

t_{ij} : ゾーンiからゾーンjへの所要時間あるいは距離

b, β, γ : パラメータ

前提条件e)により、式(3.26)はすべてのゾーン間交通需要に適用できる。

この重力モデル型の交通需要関数は、合理的な行動などの前提の下で導かれたものである。この式によると、発ゾーンの人口 A_i 、着ゾーンの集中交通量 Y_j が大きくなるほど交通需要が増加し、両ゾーン間の所要時間あるいは距離 t_{ij} が大きくなるほど交通需要が減少する。

式(3.27)のように、所要時間の交通抵抗を表すパラメータ γ は交通目的に直接にかかわるパラメータ ρ から求められるものである。この値が交通目的によって違ってくると思われる。すなわち ρ (上述したが、効用の増加率を示すパラメータである)が大きくなるほど所要時間の交通抵抗 γ が大きい。買物は2回目のトリップでも依然として効用が大きいので、 ρ が大きい。それに比べ、通勤トリップは1回で良いので、その ρ が小さい。したがって、通勤トリップの所要時間抵抗パラメータ γ は買物トリップより小さいと考えられる。

東京都市圏パーソントリップ調査のグラビティモデルのパラメータ⁶⁾からみれば、これは現実にあうような結果である。ここで、 $0 < \rho < 1$ があるので、 $\gamma > 1$ でなければならない。これも現実のデータとほぼ一致している。

式(3.28)から分かるように、パラメータ β は所要時間の交通抵抗を表すパラメータ γ に集中交通量と魅力度 α_j の関係(式(3.23))を示すパラメータ δ をかけたものである。 $\delta=1$ の場合では、魅力度は集中交通量の大きさそのものになる。つまり、ゾーンiの集中交通量がゾーンjの2倍とすると、両ゾーンの魅力度の比も2.0となる。 $\delta > 1$ の場合では、その比は2.0以上となり、 $0 < \delta < 1$ の場合では、その比は2.0以下となり、 $\delta=1$ の場合では、その比は1.0となり、 $\delta < 1$ の場合では、集中交通量の大きいゾーンの魅力度がかえって小さいということになる。したがって、 δ が大きくなるほど魅力度のばらつきが大きくなる。現実には $\delta > 1$ の場合はほとんどないということと、そして交通利用者が同じ効用関数をもっているという仮定(前提条件c))のもとで、魅力度と集中交通量が反比例することもないことから、本研究では $0 < \delta \leq 1.0$ と仮定する。よって、 $0 < \beta \leq \gamma$ の関係があると思われる。これも上述の東京都市圏の実証データ⁶⁾に証明されている。

パラメータ b (式(3.29))は交通目的を示す ρ のほか、単位交通のコストと所要時間の変換係数 λ にも関係をもっている。このパラメータは本研究のモデルに必要とする目的地選択確率の定式化において約分されるので、その説明は省略する。

(3) 目的地選択確率

目的地選択確率 h_{ij} は式(3.30)のように、ゾーンiからの発生交通量の内、ゾーンjへの交通量が占める率を意味する。

$$h_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_j X_{ij}} \quad \dots\dots(3.30)$$

交通需要関数(式(3.26))を上式の式に代入すると、

$$h_{ij} = \frac{Y_j^\beta t_{ij}^\gamma}{\sum_j Y_j^\beta t_{ij}^\gamma} \quad \dots\dots(3.31)$$

がある。このようにすることによって、目的地選択確率は、需要関数における

必要であるパラメータ b とゾーンiの人口数 A_i などの値がなくても計算できるようになった。本研究で提案するOD最大化モデルにおいては、目的地選択確率をこの式で与えることにする。

3.3.3 経路選択行動

次では、市場均衡(道路網上の交通均衡)の理論に基づき、道路網上の交通利用者の経路選択行動について考察する。

(1) 交通均衡の概念

3.3.1で説明した均衡条件、すなわち経済主体の合理的行動および完全情報の条件の下で、道路網上の交通利用者はつねに所要時間を最小にするような経路を選択すると考えられる。結果的に、「起終点間に存在する可能な経路のうち、利用される経路については所要時間が皆等しく、利用されないどの経路のそれよりも小さい」という均衡状態になる。いいかえれば、この状態では、いずれの交通利用者はプライス・テーカーとして行動し、自分の経路を変更しても、所要時間の現在値より短縮できない。これはWardropの第1原則と知られている⁷⁾。

いま、簡単な例を挙げて、交通均衡に至るまでのプロセスを説明しよう。図3-2のように、ノードAとBの間に2本の経路があり、それぞれの経路の交通量と所要時間の関係を表す走行時間関数が図3-3のようになっているとする。ここで走行時間関数を、経路1については原点を左側に、経路2については反転して原点を右側に重ねると図3-4のようになる。ただし、両原点間の距離は、このOD交通量である X となっている。いま配分交通量が点eの状態になっているとする、すなわち、交通量が経路1に u_1 、経路2に u_2 流れているとすると、経路1および経路2の所要時間は l_1 、 l_2 となる。このとき、経路1の所要時間 l_1 は経路2の所要時間 l_2 より短いので、経路2の利用者は一部経路1に移ることが考えられる。しかし、経路1への転換が多すぎると、今度は逆に経路1の所要時間が経路2よりも大きくなってしまふ。このようにして、所要時間の短い経路に移り変えることを繰り返せば、最終的には点e*の状態に達し、両経路の所要時間は等しくなる⁸⁾。この点e*は利用者最適均衡状態という。なぜなら、この状態での経路はすべての利用者にとって時間最短となっているか

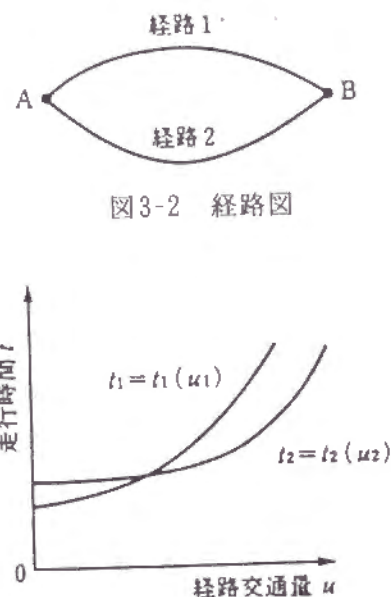


図3-2 経路図

図3-3 走行時間関数

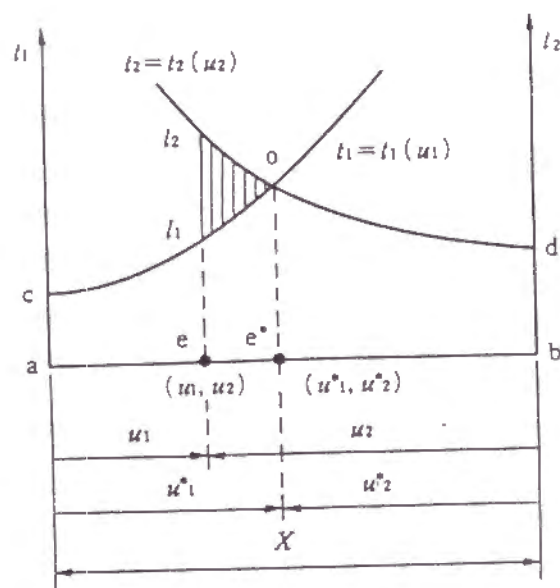


図3-4 均衡状態

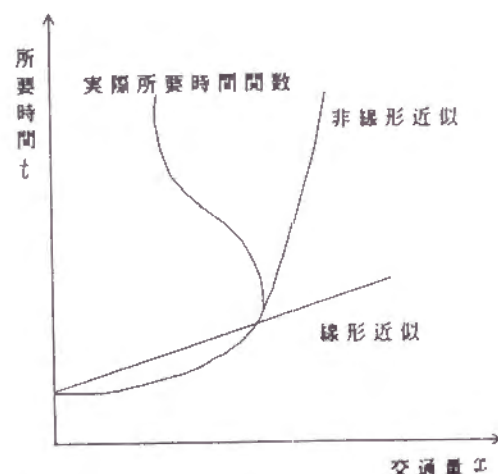


図3-5 リンク所要時間と交通量の関係

らである。

(2) 所要時間関数

リンク所要時間はリンクの交通量によって変化する。また、リンク所要時間はリンクの交通量だけでなく、リンクの渋滞状況とも関係がある。このような関係は図3-5に示されている。図中の実際の所要時間関数曲線よりわかるように、

リンク所要時間 $t(x)$ は交通量の増加に従って、曲線的に伸び、臨界状態より渋滞領域に入る、それ以降、交通量は減少するが、 $t(x)$ は急激に増加する。

このような所要時間関数はきわめて取り扱いにくいので、ふつう、図3-5に示す非線形(単調増加)関数あるいは線形関数で近似した関数を所要時間関数としている。これは、所要時間関数をリンク交通量に対して単調増加で凸関数を仮定するためである。

また、リンク所要時間関数のうち、これまでよく利用されているものは米国連邦道路局(Bureau of Public Road)の関数(略称BPR関数)である(式(3.32))。

$$t_a(v_a) = t_{a0} \cdot \{1 + r(v_a/C_a)^k\} \quad \dots\dots(3.32)$$

ここで、 C_a 、 v_a はそれぞれリンク a の交通容量と交通量、 r と k はパラメータ、 t_{a0} はリンク a の自由所要時間である。

(3) 交通均衡問題の定式化

交通均衡問題の定式化には何を変数とするかにより2つの方法がある。1つは起終点間のパスフローを変数とするものであり、他の1つは起点ごとのあるいは目的地ごとのリンクフローを変数とするものである。ここではパスフローを変数として定式化を行う。パスフローとは起点から終点までの連続したリンクの集合の上を流れる交通量をいい、ODペア ij の k 番目の経路上を流れる交通量を U_{ij}^k で表す。

ODペア ij に関するパスフローの和は、与えられたOD交通量 T_{ij} に等しくなければならないから、

$$\sum_{k \in K_{ij}} U_{ij}^k = T_{ij} \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots(3.33)$$

が成立する。ここで、 K_{ij} はODペア ij の経路の集合を表し、 I 、 J はそれぞれ起点、終点の集合を表す。

経路を代数的に表示するために、

$$K_{ij} = \begin{cases} 1 : \text{リンク } a \text{ が起終点ペア } ij \text{ の経路 } k \text{ に含まれるとき} \\ 0 : \text{その他のとき} \end{cases}$$

とすると、リンク a の交通量 v_a はこのリンクを通るすべてのパスフローの和

により表されるから、

$$v_a = \sum_{k \in K_{ij}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} U_{ij}^k \delta_{akij}, \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(3.34)$$

となる。ここで、 A はリンク a の集合を表す。パスフローはもちろん非負でなければならないので、

$$U_{ij}^k \geq 0 \quad (i \in I, j \in J, k \in K_{ij}) \quad \dots\dots\dots(3.35)$$

がある。

次に均衡条件を定式化しよう。ODペア ij の経路 k 上の所要時間を u_{kij} 、リンク a の所要時間を t_a とすると、 u_{kij} はその経由するリンクの所要時間の和により表されるから、

$$u_{kij} = \sum_{a \in A} \delta_{akij} t_a \quad (i \in I, j \in J, k \in K_{ij}) \quad \dots\dots\dots(3.36)$$

となる。

ODペア ij の経路 k 上の所要時間を u_{ij} とすると、「起終点間に存在する可能な経路のうち、利用される経路については所要時間が皆等しく、利用されないどの経路のそれよりも小さい」という条件は、

$$\sum_{a \in A} \delta_{akij} t_a = u_{ij} \quad (U_{ij}^k > 0 \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots(3.37)$$

$$\sum_{a \in A} \delta_{akij} t_a \geq u_{ij} \quad (U_{ij}^k = 0 \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots(3.38)$$

と表すことができる。

ここで、各リンクの所要時間はリンク走行時間関数より

$$t_a = t_a(v_a) \quad (a \in A) \quad \dots\dots\dots(3.39)$$

に等しい。したがって、均衡問題は、与えられたOD交通量マトリクス $[T_{ij}]$ および各リンクの走行時間関数 $t_a(v_a)$ に対して、式(3.33)～(3.39)を満足するパスフロー U_{ij}^k およびリンクフロー v_a を求める問題となる。

式(3.33)～(3.39)を満足するフローの組み合わせを求めることは、きわめて困難である。なぜなら、これらは不等式を含む非線形方程式よりなり、また経路は起終点間の可能なすべての経路を考えなければならないからである。

しかし、この問題は、式(3.33)～(3.39)を制約条件として、ある目的関数を最小化する非線形計画問題と等価であることが明らかにされた⁹⁾¹⁰⁾。目的関数は次のように表される。

$$S = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad \dots\dots\dots(3.40)$$

このように、交通均衡問題は次のように定式化されている。

$$\text{Min: } S = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad \dots\dots\dots(3.41)$$

Subject to:

$$\sum_{k \in K_{ij}} U_{ij}^k = T_{ij} \quad (i \in I, j \in J) \quad \dots\dots\dots(3.42)$$

$$v_a = \sum_{k \in K_{ij}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} U_{ij}^k \delta_{akij}, \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(3.43)$$

$$U_{ij}^k \geq 0 \quad (i \in I, j \in J, k \in K_{ij}) \quad \dots\dots\dots(3.44)$$

(4) 交通均衡問題の解法

交通均衡問題は、数理計画問題に置換することができるが、これを汎用的な非線形最適化手法を用いて解くことがきわめて困難である。なぜなら、この定式化では起終点間のすべての可能な経路を対象にしているため、実際の交通量配分に用いられる規模のネットワークでは変数の数が膨大となり、またそれらのすべての可能な経路を探索し、記憶することも不可能に近い。それゆえこの問題に適した能率的な解法が考案されてきた。その代表的なものとして、分割配分法(Incremental Assignment 法、略称IA法)¹¹⁾、L. LeBlanc らによって提案された Frank-Wolfe 法¹²⁾、Wayne法¹³⁾¹⁴⁾、井上が提案した勾配射影法による方法¹⁵⁾などがある。

次では、最も実用的な近似解法であるIA法について紹介する。

IA法は交通均衡における人の交通量を道路網に配分していく方法である。従来よりこの手法は近似的な方法として実務上よく用いられている。本研究でも、この方法を用いる。その計算手順は以下のようである。

STEP 1 OD交通量 T_{ij} を N で分割する(N :分割回数)

STEP 2 リンク所要時間 $t_a^{(n)}(x)$ を計算する。

STEP 3 すべてのODペアに対し最短経路を探索する。

STEP 4 分割されたOD交通量 T_{ij}/N を最短経路に配分する。

STEP 5 リンク交通量を計算する。

STEP 6 もし $n = N$ であれば、計算を終了し、そうでなければ $n = n + 1$ としてSTEP 2へ戻る。

(5) 経路選択確率

以上のように、OD交通量が決まっていれば、各交通利用者が各自の走行時間が最小になるよう行動する結果、道路網が交通均衡状態になり、(4)で示した解法を用いて、各リンクのOD別利用確率、つまりOD交通量の経路選択確率が分かる。

3.4 OD交通量の最大化モデル (OD最大化モデル)¹⁸⁾

3.4.1 定式化

目的地選択行動と経路選択行動が上のように仮定されると、OD最大化モデルは次のように定式化できる。

上位問題

$$\text{Max} : \sum_{i \in I} O_i \quad \dots\dots\dots(3.45)$$

Subject to :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} O_i h_{ij} p_{ij}^a \leq \mu_a C_a \quad a \in A \quad \dots\dots\dots(3.46)$$

$$D_j = \sum_{i \in I} O_i h_{ij} \quad j \in J \quad \dots\dots\dots(3.47)$$

$$O_i^l \leq O_i \leq O_i^u, D_j^l \leq D_j \leq D_j^u \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots\dots(3.48)$$

下位問題

$$h_{ij} = \frac{D_j^l R_{ij}^r}{\sum_j D_j^l R_{ij}^r} \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots\dots(3.49)$$

$$\text{Min} \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad \dots\dots\dots(3.50)$$

Subject to :

$$v_a = \sum_{k \in K_{ij}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} U_{ij}^k \delta_{akij}, a \in A \quad \dots\dots\dots(3.51)$$

$$\sum_{k \in K_{ij}} U_{ij}^k = O_i h_{ij} \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots\dots(3.52)$$

$$U_{ij}^k \geq 0 \quad i \in I, j \in J, k \in K_{ij} \quad \dots\dots\dots(3.53)$$

ここに、

O_i : ザーン i の発生交通量

h_{ij} : 発ゾーン i から見た着ゾーン j の選択確率, $\sum_{j \in J} h_{ij} = 1.0$.

p_{ij}^a : ザーン i からゾーン j へのOD交通がリンク a を利用する確率

μ_a : リンク a の許容混雑度

C_a : リンク a の交通容量

D_j : ザーン j の集中交通量

O_i^u : ザーン i の発生交通量の上限值

D_j^u : ザーン j の集中交通量の上限值

O_i^l : ザーン i の発生交通量の下限值

D_j^l : ザーン j の集中交通量の下限值

R_{ij} : ザーン i, j 間の距離

v_a : リンク a の交通量

$t_a(\cdot)$: リンク a の走行時間関数

U_{ij}^k : ODペア i j 間の k 番目経路のOD交通量

δ_{akij} : ODペア i j 間の k 番目経路がリンク a を経由するとき 1, そうでなければ 0

I : 発ノードの集合

J : 着ノードの集合

A : リンクの集合

K_{ij} : ODペア間の利用可能経路の集合

上位問題において、式(3.45)は各ゾーンの発生交通量の和を最大化するという目的関数である。式(3.46)はリンクの交通量は許容混雑度 μ_a をリンク容量 C_a に乗じた交通量以下とする制約条件であり、計画主体が望んでいるサービス水準が反映されている。式(3.47)はゾーンの発生交通量と集中交通量の関係式である。式(3.48)はゾーン発生・集中交通量の範囲の制約条件である。 O_i^u 、 D_j^u はゾーン i の土地利用の容量を交通量ベースで示すもので、発生・集中交通量はその容量以下でなければならない。 O_i^l 、 D_j^l はゾーン i の発生・集中交通量の下限値を表す。計画主体は地域の活力の維持のため、そのゾーンの発生・集中交通量とその値以上となるよう、土地利用を誘導していく方針を示す。このように、上位問題はリンク容量を最大限に利用するような各ゾーンの発生

交通量を求める問題となる。下位問題において、式(3.49)は交通需要関数から導かれた目的地選択確率である。式(3.50)～(3.53)は需要固定型の利用者均衡問題であり、リンクのOD別利用率 p_{ij}^* を決めるものである。

モデルに対するインプットデータは道路網の要素(ノード、リンク)、リンク容量、リンク許容混雑度 μ_a 、リンク走行時間関数、ノードの発生・集中交通量の許容範囲および重力モデルのパラメータ β 、 γ である。アウトプットは道路網全体として処理可能な最大トリップ数を与える各ゾーンの発生交通量である。発生交通量の解が得られれば、目的地選択確率を用いて、OD交通量 X_{ij} および各ゾーンの集中交通量 D_j を計算することができる(式(3.54)、(3.47))。ここで、目的関数の最大化が得られるときのOD交通量を最適OD交通量と呼び、そのときの発生・集中交通量を最適発生・集中交通量と呼ぶ。

$$X_{ij} = O_i h_{ij} \quad \dots\dots\dots (3.54)$$

以上のOD最大化モデルの定式化において、目的地選択確率 h_{ij} が一定であれば、定式化は2レベル最適化問題のうち、Stackelberg問題と呼ばれる問題になり、その解の存在性などおよび解法がすでに開発されている(次の3.4.2、3.5で詳しく述べる)。本研究では、目的地選択確率は重力モデル(式(2))で与えると仮定しているが、ゾーンの集中交通量 D_j はモデル計算の結果であるゾーンの発生交通量 O_i から求められるため(式(3.49))、繰り返し計算が必要である。すなわち、前回のコンプレックス法を用いたモデル計算の結果から D_j を求め、この D_j を用いて目的地選択確率を更新し、さらにモデル計算を行い、このような繰り返し計算を最大トリップ数が安定になるまで行う。

しかし、以上のような繰り返し計算は、解が収束する保証はないので、次のような近似計算方法を採用。すなわち、現実のODデータに基づき、目的地選択確率を求め、この選択確率の下でStackelberg問題を解き、その解として求められた集中交通量を将来のゾーンの吸引力として目的地選択確率を更新し、さらにStackelberg問題を解く。そのときのOD交通量を道路網と整合性を有するOD交通量とする。

3.4.2 Stackelberg問題の解の存在性と一意性

(1) 解の存在性

一般に、Stackelberg問題((3.1)～(3.4))の解が存在するための条件は、以下の通りである¹⁷⁾。

① 関数 f_1 、 f_2 、 g_1 は (x, y) に関して連続関数であること。つまり、上位・下位問題の目的関数、および上位問題の制約条件を表す関数は、上位・下位の決定変数に対して連続であること。

② 下位問題の制約領域 $g_2(x, y^*(x)) \leq 0$ は凸集合であり、下位問題は実行可能であること。

③ x が与えられたという条件の下での下位問題の解を $y^*(x)$ とすれば、 $g_1(x, y^*(x)) \leq 0$ は空でないこと。つまり、上位問題の決定変数と、それに対する下位問題の最適解を用いて表された上位問題の制約領域が空でないこと。

定式化した問題は明らかにこれらの条件を満足するから、解の存在性は保証できる。

より直感的には以下のように説明できる。

実行可能解の集合(必ずしも凸である必要はない)が与えられたとき、その中で上位の目的関数の値を最適にするものを選べば、それがStackelberg解である。したがって、実行可能解の集合が空でない限り、Stackelberg解は存在する。定式化したOD最大化問題の可能解集合は空でないから、最適解は存在する。

(2) 解の一意性

ここで定式化した問題は、必ずしも解を一意に決定できるとは限らない。例えば、ボトルネック上流部に全く同じ目的地選択確率を持つ2つの発生ゾーンがあるとき、両ゾーンからの発生交通量の合計を求めることは可能でも、個々のゾーンの発生交通量を一意に決めることはできない。しかしこの場合でも、トータル交通量の最大化という制御目的は達成されているから、解の一意性保証できないということが本質的な問題ではない。

(3) 制約領域の凸性

数値計算により解を求める場合は、実行可能領域の凸性を吟味しておく必要がある。実行可能領域が凸でなければ、アルゴリズムの収束点が単なる局所最適点となる場合も生じる。

3.5 で説明するコンプレックス法のアルゴリズムでは、制約領域が凸空間でないとき、シンプレックスが必ずしも最適解に収束しない。本論文では厳密な凸性の証明を与えていないが、凸性については以下のように考えている。

一般に、走行時間関数として線形関数を用いた場合、リンクフローは発生交通量 O_i の関数として解析的に求められ、リンク容量制約条件式は線形となるから、制約領域は凸である。さらに、BPR関数などの非線形単調増加関数を用いた場合、区分解線形関数で近似した場合も、同様に領域は凸である。いま、区分解線形関数の区分数を十分大きくするとき、BPR関数は区分解線形関数によって限りなく近似され、制約領域の凸性は保証される。したがって、走行時間関数として非線形なBPR関数を用いた場合でも、制約領域は凸空間であると考えられる。

3.5で説明するコンプレックス法は、実行可能領域が凸である限り、大域的最適解に収束する。

(4) 定式化の拡張と簡略化

ここで示した定式化における制御変数、目的関数に類似の変数、関数を用いても、同様の定式化が可能である。制御変数に関しては、例えば、複数のゾーンからの発生交通量の合計を、1つの制御変数とする方法や、いくつかのゾーンの発生交通量が一定の場合、つまりいくつかの制御変数を常数とすることもできる。

いずれの場合も、変数の数が減少するので、アルゴリズムの負担は小さくなる。

目的関数は、総交通量の最大化の他に、総利用距離の最大化、総走行費用の最小化（ただし、平面街路を含めて考える必要がある）を用いることも可能である。

3.5 数値計法

3.4で定式化したOD最大化モデルは、制約条件が非線形でかつ陽には与えられないので、解析的に制約領域を明示することができない。そのため、目的関数と制約条件式の勾配を用いる通常の勾配法によって最適解探索することは難しい。

そこで、本研究では、勾配を利用しない試行探索のうち、Spendleyらが開発したシンプレックス法に基づく一連の成果¹⁸⁾の応用を考える。ここで、シンプレックスとは、 n 次元空間における $(n+1)$ 個以上の点を頂点のうち、少なくとも $(n+1)$ 個は1次独立でなければならない。シンプレックス法は、「シンプレックスの頂点の中で最悪の目的関数値をとる点の残りの頂点の図心に関する鏡映点は、目的関数値を改善させることが期待できる」という考え方にもとづいている。この期待が正しければ鏡映のプロセスを続けていくことにより、シンプレックスを最適点に近づけることができる。図3-6は3次元空間のシンプレックスと鏡映点を示している。

Spendleyらのシンプレックス法は、探索の手段としては鏡映動作のみを考え、すべての頂点間の距離が等しい正三角錐のシンプレックスを用いていた。

Nelder & Meadにより提案された改良シンプレックス法¹⁹⁾はシンプレックスを正三角錐に限らず、探索の手段も基本動作である鏡映のほか、目的関数の形状に応じて、伸張、収縮、縮小などの修正動作を加えることにより効率化をはかったものである。図3-7は、このようなシンプレックスが最適点に収束していく様子を示す。

さらに、Boxはシンプレックス法を不等式制約付きの最小化問題に拡張し、これをコンプレックス法(Constrained Simplex Method)と呼んだ²⁰⁾。この方法はシンプレックス法のアルゴリズムに、鏡映点が制約条件を満たすような修正手順を加えた探索法である。

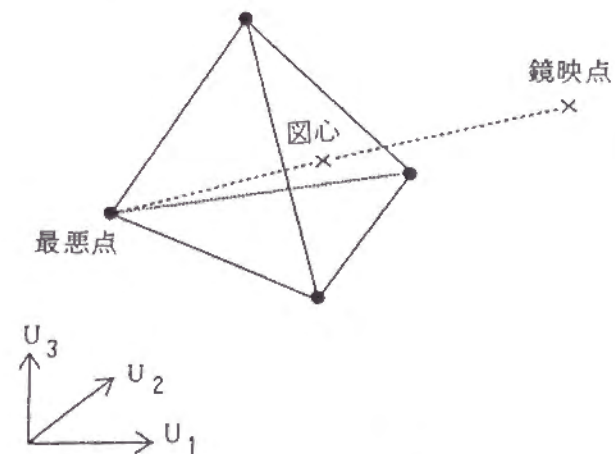


図3-6 シンプレックスと鏡映点

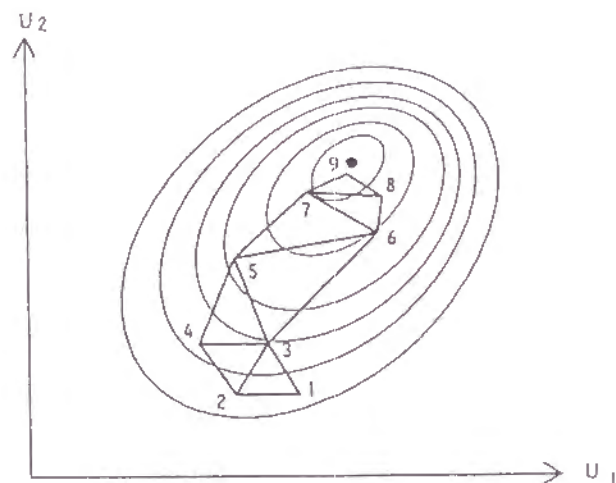


図3-7 シンプレックスによる解の探索

3.5.1 コンプレックス法²¹⁾²²⁾

定式化した最適流入制御問題にコンプレックス法を適用することを考える。このとき、シンプレックスの頂点は、問題の制御変数であるゾーンの発生交通量のベクトル

$$U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$$

で与えられる。頂点は n 個の独立変数によって定められる n 次元空間における点と考えられるから、 $(n+1)$ 個以上のゾーンの発生交通量のベクトルを考えることによりシンプレックスを形成することができる。制約条件を満たす任意の発生交通量の組み合わせに対して、下位問題を解けば利用者均衡フローを求めることができるから、頂点の実行可能性を判定するためには、均衡リンク交通量が区間容量制約を満足するかどうかを調べればよい。

コンプレックス法を用いた解法では、まず制約条件を満たす $(n+1)$ 個以上の発生交通量ベクトルからシンプレックスを作る。次に、改良シンプレックス法を用いて、上位問題の目的関数値 $f(U)$ を増加させる方向にシンプレックスを移動させる。シンプレックスを更新するごとにその頂点が制約条件を満たすかどうかを調べ、もしそうでない場合は制約条件を満たすように修正動作を行い、最適解に収束させる。

3.5.2 計算アルゴリズム

記号を以下のように定義する。

$f(U)$: 上位問題の目的関数

U^k : n 次元空間におけるシンプレックスの k 番目の頂点

$$U^k = (U_1^k, U_2^k, \dots, U_n^k)$$

U^L : シンプレックスにおける目的関数の最小点 (最悪点)

U^H : シンプレックスにおける目的関数の 2 番目の最小点

U^S : シンプレックスにおける目的関数の最大点

U^G : 最悪点 U^L を除いたすべての頂点の図心

つぎに、この方法で用いる 5 種の操作を以下のように定義し、2 次元の場合についての操作を図に示す。

① 鏡映

U^L を次式により鏡映し、試行点 U^k を求める (図3-8)。

$$U^k = (1 + \alpha) U^G - \alpha U^L \quad \dots\dots(3.55)$$

α : 鏡像係数 ($\alpha > 0$)

② 拡張

鏡映点 U^k の方向に、その点を超えて試行点をさらに移動することを拡張という (図3-9)。これによって目的関数値の改良がさらに期待できるときは、次式により拡張し、 U^E 点をとる。

$$U^E = \gamma U^k + (1 - \gamma) U^G \quad \dots\dots(3.56)$$

γ : 拡張係数 ($\gamma > 1$)

③ 収縮

鏡映により目的関数値の増加が期待できない時の操作である。このとき、最悪点 U^L を式(3.57)(3.58)に示す U^G におきかえる操作によって、シンプレックスの収束を行う。

$f(U^L)$ と $f(U^k)$ の大小関係により 2 種類の収縮が考えられる。

収縮 A :

$f(U^L) < f(U^k)$ の場合、 U^k の内側の内分点に戻すほうが解の改善が期待できる。(図3-10a)

$$U^C = \beta U^k + (1 - \beta) U^G \quad \dots\dots(3.57)$$

β : 収縮係数 ($0 < \beta < 1$)

収縮B :

$f(U^L) \geq f(U^k)$ の場合, U^L の側の内分点に戻す (収縮B, 図3-10b) .

$$U^C = \beta U^L + (1 - \beta) U^G \quad \dots\dots(3.58)$$

④ 縮小

シンプレックスの大きさが, 問題に対して適正でない場合にとられる手法で, すべての頂点 U^k を目的関数値の最も大きい点 U^S の方向へ1/2ずつ移動させて縮小したシンプレックスを作る (図3-11) .

$$U^{kR} = (U^k + U^S) / 2 \quad \dots\dots(3.59)$$

⑤ 許容化

試行点 U^k が制約条件を満足しないならば, U^G 方向へ収縮率1/2で3回までもどし, 許容点 $U^{k'}$ を見つける. それでも許容点が得られないならば, U^G で許容かを判定し, なお許容点でないなら, シンプレックスを U^S に向かって縮小する (図3-12) .

①から⑤の操作を組み合わせた具体的な解法の手順は以下に示す通りである. 解法の手順をフローにすると, 図3-13のようになる.

STEP 1 最初のシンプレックスを作り, 各頂点での関数値を求めて U^L , U^H , U^S , U^G を決める.

STEP 2 鏡映操作を行い, 試行点 U^k とそれに対する目的関数値 $f(U^k)$ を求める.

STEP 3 新しいシンプレックスを作成する.

$f(U^H) > f(U^k)$ の場合は, 試行点 U^k が新しいシンプレックスにおいても最悪点となり目的関数の改良が見込めないので, STEP 5 へ.

$f(U^k) \geq f(U^H)$ の場合は, 目的関数の改良が期待できるので, STEP 4 へ.

STEP 4 U^k の許容化判定をおこなう. U^k が許容点でなければ, 許容化アルゴリズムを用いて, U^k を許容化した $U^{k'}$ を求め, U^L の代わりに採用する. 許容点であれば, 以下の操作を行った後, STEP 6 へ.

① $f(U^S) > f(U^k) \geq f(U^H)$ の場合, U^L の代わりに U^k を採用する.

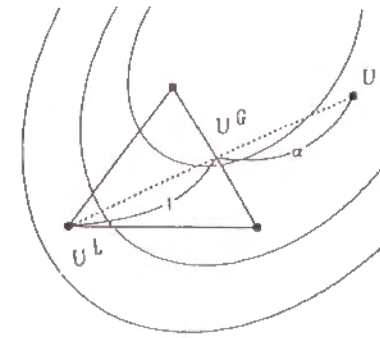


図3-8 鏡映

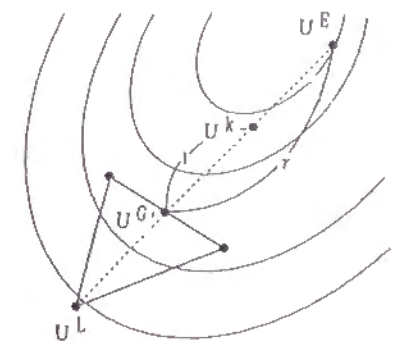


図3-9 拡張

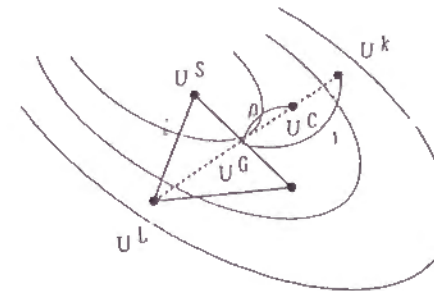


図3-10a 収縮A

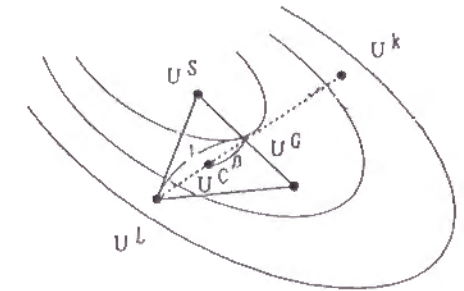


図3-10b 収縮B

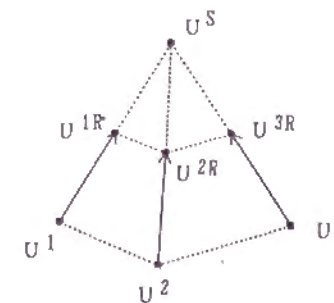


図3-11 縮小

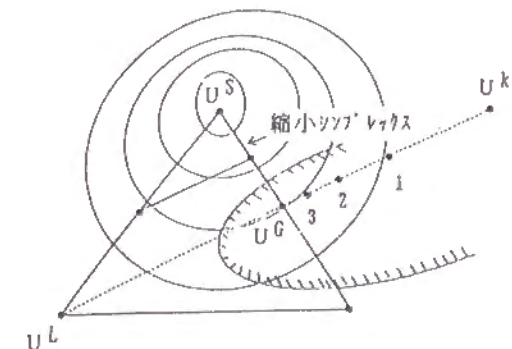


図3-12 許容化

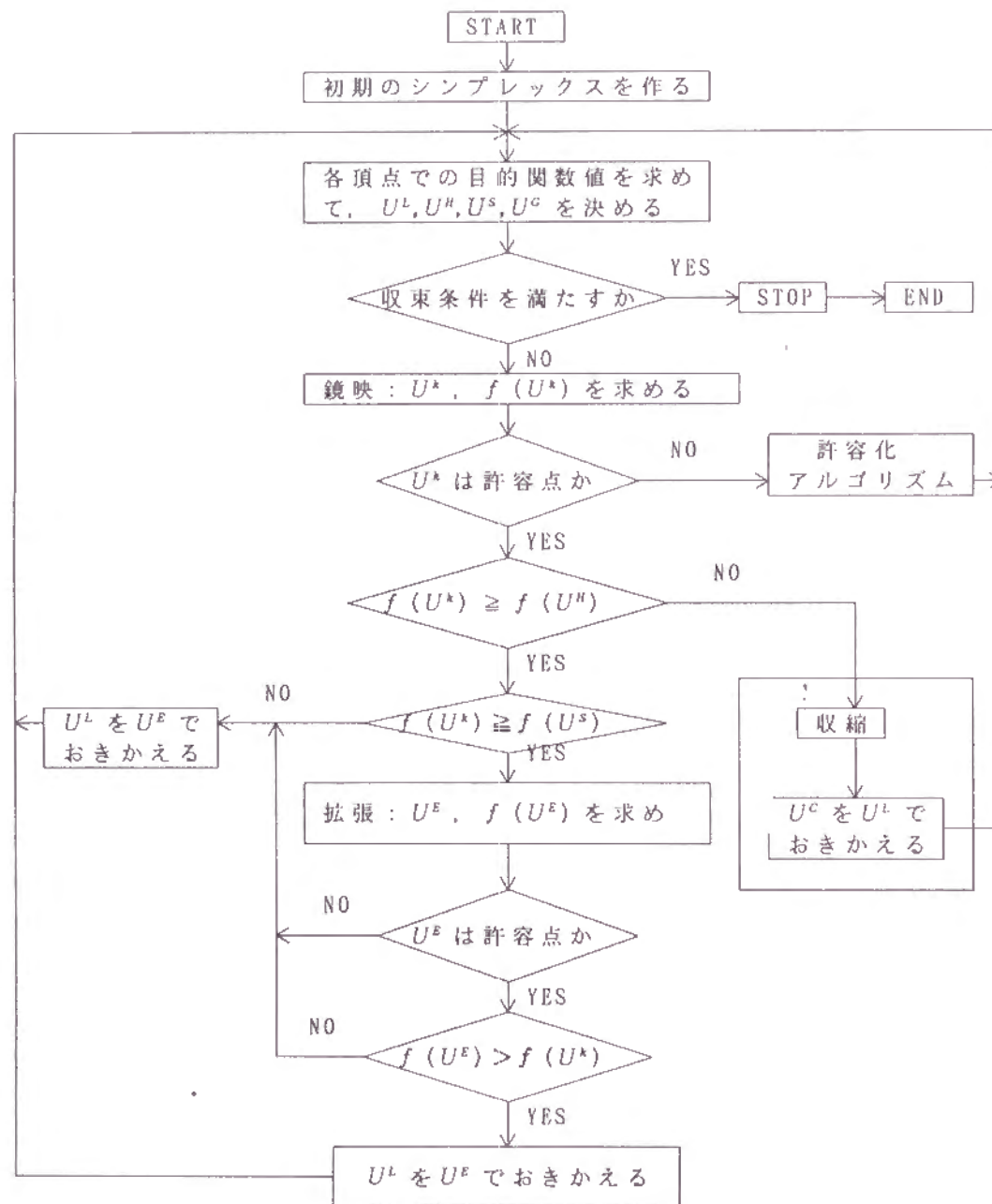


図3-13 計算アルゴリズム

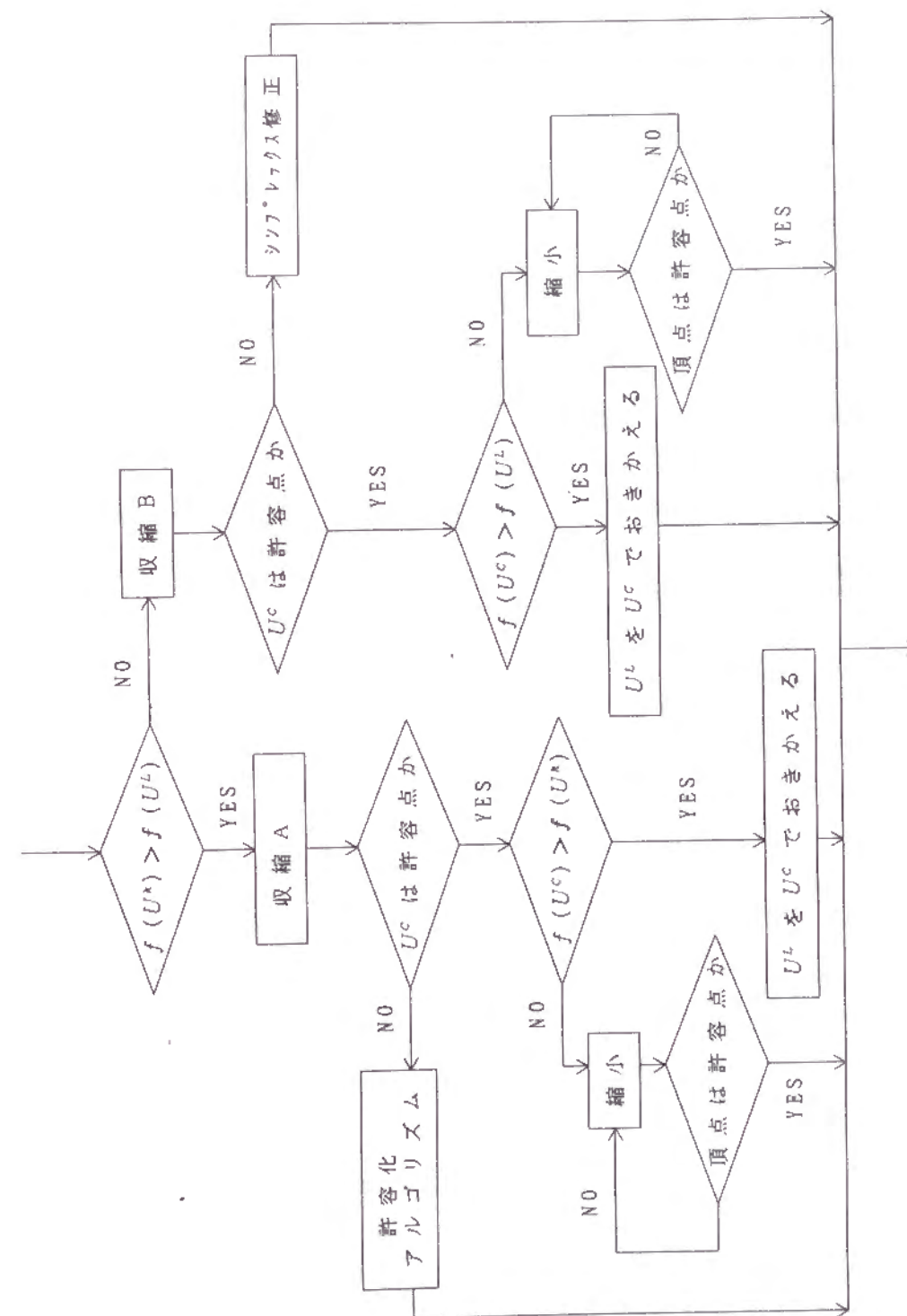


図3-14 収縮のアルゴリズム

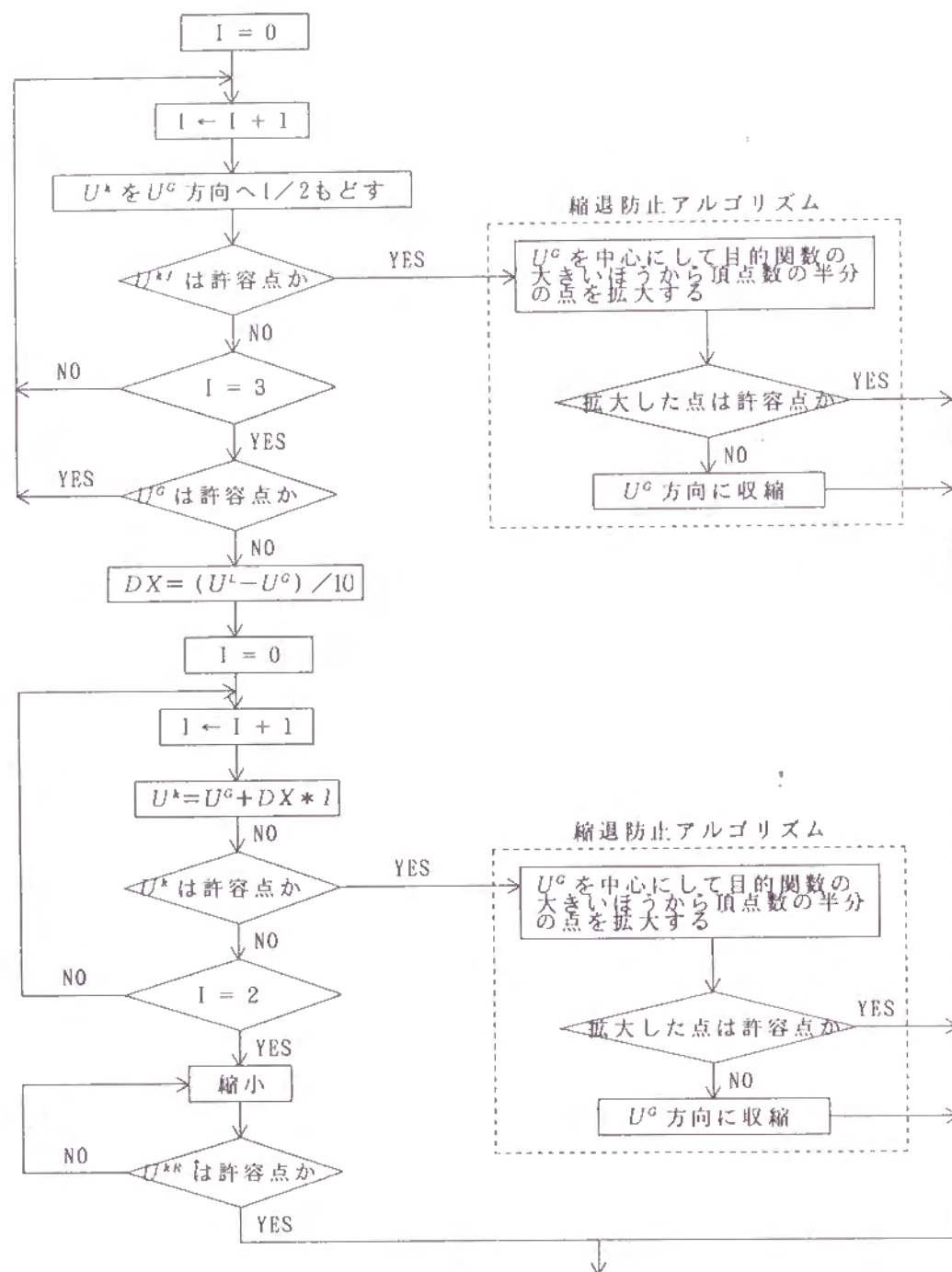


図3-15 許容化アルゴリズム

② $f(U^k) \geq f(U^L)$ の場合、試行点が新しいシンプレックスに含まれ、その方向で一層の改善が期待できるので、拡張を行う。 $f(U^E) > f(U^k)$ かつ U^E が許容点のときには、 U^L の代わりに U^E をとり、他の場合には U^L の代わりに U^k を採用する。

STEP 5 つぎの収縮あるいは縮小操作を加え、STEP 6 へ。そのアルゴリズムは図3-14になる。

STEP 5-1 $f(U^L) \geq f(U^k)$ の場合、 U^k を U^L 側へ収縮（収縮B）し、 U^C を求める。

① U^C が許容点のとき、 $f(U^C) > f(U^L)$ なら収縮は成功で、 U^L の代わりに U^C を採用する。もし、 $f(U^C) \leq f(U^L)$ なら収縮は失敗で、シンプレックスを縮小する。

② U^C が許容点でないときは、非許容領域をシンプレックスが包んでいるから、シンプレックスを制約領域の形状にあった適正な大きさに縮小する。

STEP 5-2 $f(U^L) < f(U^k)$ の場合、 U^k 側へ収縮（収縮A）し、 U^C を求める。

① U^C が許容点のとき、STEP 5-1の①と同様の処理を行う。

② U^C が許容点でないときは、許容化アルゴリズムを用いて、許容な $U^{C'}$ を見出し、 U^L の代わりに採用する。

STEP 6 シンプレックスの大きさが小さくなり、収束判定条件を満たせば、手続きを停止する。収束判定条件としては、各頂点の目的関数値の変動係数 ϵ

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f^k - \bar{f}) / \bar{f} \quad \dots\dots(3.60)$$

f^k : 第k番目の頂点の目的関数値

\bar{f} : 目的関数値の平均

が十分小さくなったとき、最適点に収束したと考える。収束していなければ、新しいシンプレックスについて STEP 2 以降の手続きを再開する。

この手順において、シンプレックスの頂点が制約領域を満足しないとき、許容化アルゴリズムによって、制約領域内の許容点をみつける。許容化アルゴリズムを図3-15に示す。

しかし、制約条件つき問題へコンプレックス法を適用する場合、許容化アル

ゴリズムだけでは、制約条件の近くでシンプレックスの退縮防止アルゴリズムを用いる。

縮退防止アルゴリズム：目的関数値の大きいほうから半数の頂点を考える。図心 U^G を中心にして、それぞれの点を p 倍だけ拡大した点 U_p^G で置き換えることにより、シンプレックスを再構成する。そして、各頂点の目的関数値と U^k を許容化した U^{k+1} の目的関数値を比較して、最大値を与える点 U^L の代わりに採用する。ただし、 U_p^G が許容点でないときは、 U^G に向かって $1/3$ ずつ収縮する。

このような操作によって、シンプレックスの縮退を防ぎ、境界に沿って転がすことができる。

3.6 計算例

図3-16のような、A、B、Cの3つのノードと6本のリンクからなる道路網を例として最大トリップ数、最適OD交通量を求める。ゾーン間の距離 l は $l_{AB}=3$ 、 $l_{AC}=4$ 、 $l_{BC}=5$ とする。往復リンクの容量は同じで、リンク1, 2, リンク3, 4, リンク5, 6の容量 C_a はそれぞれ100, 200, 150とする。

リンク許容混雑度 μ_a はすべてのリンクについて1.0とする。すなわち、どのリンクでも交通量がリンク容量いっぱいまで利用できる。計算手順を具体的に示すための計算例であるから、ゾーンの土地利用容量の制約を表す発生・集中交通量の上限値 O_i^U 、 D_i^U は無限大とし、土地利用開発の最小値を表す発生

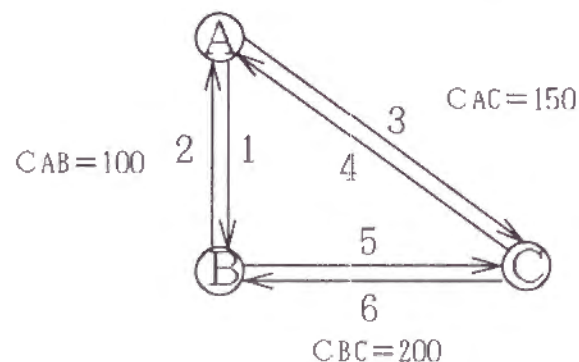


図3-16 計算例の道路網

・集中交通量の下限値 O_i^L 、 D_i^L は0とする。重力モデルのパラメータは後述の京都市の場合（第5章で述べる）を参考にして、 $\beta=0.8$ 、 $\gamma=1.0$ とする。リンク走行時間関数は次のBPR関数で与える。

$$t_a(v_a) = t_0 \left(1.0 + 2.62 \left(\frac{v_a}{C_a} \right)^{5.0} \right) \quad \dots\dots(3.61)$$

まず、式(6)に $\beta=0.0$ 、 $\gamma=1.0$ を代入し、距離だけに影響される場合の目的地選択確率を計算する。その目的地選択確率を用いてOD最大化モデルを解き、最適集中交通量の分布 D_j^* を求める。その結果は

$$D_A^* = 225, D_B^* = 249, D_C^* = 139 \quad \dots\dots(3.62)$$

となる。 D_j^* はゾーンの吸引力のウェイトを決めるものである。この結果から、3つのゾーンの吸引力の大きさの関係が分かる。つまり、ノードA、Bの吸引力のウェイトがほぼ同じで、ノードCの吸引力のウェイトが最も小さいということが分かる。これは図を見ても分かるように、ほかの2つのノードまでの距離はノードBはそれぞれ3, 4, Aはそれぞれ3, 5, Cはそれぞれ4, 5になっており、BとAはより集中しやすい位置になっているからである。

次に、式(3.62)の各ゾーンの集中交通量、 $\beta=0.8$ 、 $\gamma=1.0$ を式(3.49)に代入し、目的地の吸引力も考慮した目的地選択確率を計算する。そして、更新された目的地選択確率を用いてStackelberg問題を解き、道路網の最大トリップ数および最適OD交通量を計算する。その時の目的地選択確率は表3-1、計算結果は表3-2に示す。

表3-1 目的地選択確率

	A	B	C
A	0.0000	0.7266	0.2734
B	0.6622	0.0000	0.3378
C	0.4245	0.5755	0.0000

表3-2 最適需要分布

	A	B	C	O
A	0	100	38	138
B	118	0	60	178
C	111	150	0	261
D	229	250	98	577

ノードAの発生交通量のうち、72.66%はノードBを選択し、残り27.34%はノードCを選択するので(表3-1)、両者の交通量の比 $X_{AB} : X_{AC}$ は72.66 : 27.34 = 100 : 38でなければならない。ノードAの発生交通量を最大にするためには、リンク1の容量(100)は全部A、B間の交通量 X_{AB} に使われる。このように $X_{AB}=100$ 、 $X_{AC}=38$ になる。同じ原則に従って、 $X_{BA}=100$ 、 $X_{BC}=51$ 、 $X_{CA}=111$ 、 $X_{CB}=150$ となる。この時、リンク1、2、6は混雑度1(容量制約が活性)となり、その走行時間は10.9、10.9、14.5になっている。一方、リンク3、4、5には容量に比べ交通量がまだ少ない(所要時間はそれぞれ5.0、5.7、5.1)ので、リンク4とリンク5の所要時間の和がリンク1の所要時間よりも小さく、利用者均衡条件に基いて、 X_{BA} の迂回交通が生じ、 $B \rightarrow C \rightarrow A$ 、 $B \rightarrow A$ 両経路の所要時間が等しくなるまでノードBの発生交通量を増やすことができる。ほかのノードは現在利用している経路以外の経路を利用すると、所要時間が現経路より長く、迂回交通はすでに不可能であるので、最後にBの発生交通量だけをさらに27単位増し、最大となるOD交通量は表3-2のようになった。

最適発生交通量分布を見てみると、ノードA、B、Cの順で138 : 178 : 261の比率、単位化すると1 : 1.3 : 1.9になっている。言い換えれば、ノードCは発生交通量の多い土地活動、例えば朝のピーク時間帯の交通に基づいて考えるならば、住宅を立地するのが有利である。最適集中交通量分布を見てみると、その比は229 : 250 : 98(すなわち2.3 : 2.6 : 1)になり、ノードA、Bには集中交通量の多い土地活動、例えば産業を立地するのが有利であることが分かる。

3.7 結語

本章では、都市のバランスのとれた発展のためには交通需要管理が必要であることを確認し、交通需要分布と道路網の整合性を保つことのできる都市計画を策定するための支援モデルを提供することを目的としている。

得られた成果としては、与えられた道路網に整合するような交通需要パターンおよび道路網に負荷できる最大トリップ数を算出できるOD最大化モデルを提案した。このモデルは、従来のODパターン一定とした道路網容量問題と違って、道路網を最も効率的に利用するため、交通需要パターン(ODパターン)

も内生的に求められる問題となっている。したがって、このモデルを用いて、交通需要管理、特に成長管理や自動車流入制限ゾーンの量的な指針を与えることができる。また、道路網代替案の評価・比較にも利用できる。

一方、モデルの構造面および実用計算面については、以下の問題点が今後の課題として残されている。

① モデルの定式化において、重力モデル式の交通需要関数はODペア間の交通量は、距離と目的地の吸引力によるものと仮定した。しかし、現実では、距離よりも走行時間の影響が強いと思われる。走行時間を交通需要関数に取り込んでモデルを改良することが必要であろう。

② OD最大化モデルは2レベル最適化問題として定式化されている。本研究では、モデルの開発・応用に重点を置き、計算アルゴリズムは従来用いられてきたコンプレックス法を用いた。しかし、このアルゴリズムは、道路網の規模が大きくなると、計算時間が激増し、場合によっては最適解を得られない場合もある。さらに大規模な道路網に応用し、より具体的な計画に応用するためには、効率的で精度の高いアルゴリズムの開発に力を入れるべきであろう。

参考文献

- 1) 鈴木光男(1981): ゲーム理論入門, 共立出版, pp.52-58.
- 2) 西村和雄(1986), ミクロ経済学入門, p.3, pp.195-196. 岩波書店.
- 3) 飯田恭敬(1992), 交通モデルの課題と展望, 土木計画学研究・論文集, pp.1-13.
- 4) 林 直嗣(1992), ミクロ経済学入門, pp.103-104. 世界書院.
- 5) Bechmann, M.J. and T.F.Golob(1970), A utility model for travel forecasting, Transportation Science, Vol.4, No.4, pp365-382.
- 6) 山形耕一・森地茂(1992), 新体系土木学60・交通工学.

- 7) Wardrop, J. G. (1952): Some theoretical aspects of road research, Proceeding, Institute of Civil Engineers, Part 2.
- 8) Kanafani, A. (1983): Transportation Demand Analysis, MacGraw-Hill Book.
- 9) Beckman, M., McGuire, C. and Winsten, C. (1956): Studies in the economics of transportation, Yale University Press.
- 10) Jorgensen, N. O. (1963): Some aspects of the urban traffic assignment problem, I. T. T. E. Graduate Report, University of California, Berkley.
- 11) Final Report of the Highway Transportation Demand Research Project, Research Report R 65-24, M. I. T., 1965.
- 12) Leblanc, L. J., Morlok, E. K. and Pierskalla W. P. (1974): An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, Transport Research Vol. 9, pp. 309-318.
- 13) Smoch, R. (1962): An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks, H. R. B. Bulletin 347, pp. 60-66.
- 14) Powell, W. B. and Sheffi, Y. (1982): The convergence of equilibrium algorithms with predetermined step sizes, Transportation Science, Vol. 16, No. 1, pp. 45-55.
- 15) 井上博司(1970): 混雑した道路網における均衡交通量配分の勾配射影法による解法, 土木学会論文報告集, 第313号, pp. 125-133.
- 16) 飯田恭敬・李燕(1992): 重力モデルに基づいた道路網の最大OD交通量に関する考察, 土木計画学研究・講演集, No. 15(1), pp. 25-32.
- 17) 志水清孝(1976): システム最適化理論, pp. 92-99, コロナ社.
- 18) Kowalik, J. & Osborne, M. R. (1970): 非線形最適化問題, 山本善之・小山健夫共訳, pp. 27-33, 培風館.
- 19) Nelder, J. A. & Mead, R. (1965): A simplex method for function minimization, Computer J., Vol. 7 pp. 308-313.
- 20) Box, M. J. (1965): A new method of constrained optimization and a comparison with other methods, Computer J., Vol. 8, pp. 42-52.
- 21) 飯田恭敬・朝倉康夫・田中啓之(1989): 複数経路を持つ都市高速道路網における最適流入制御モデルの定式化と解法, 土木学会論文集, No. 449/IV-17, pp. 135-144.
- 22) 田中啓之(1990): 複数経路を持つ都市高速道路の最適流入制御方法, 京都大学修士論文.

第4章 一般的な道路網形状に対する 整合性の分析¹⁾

4.1 概説

地価高騰や環境問題等の原因で、都市内道路の新設や改良は困難になりつつあり、道路網の効率的な構築だけでなく、交通需要のマネジメントも重要視されている現在、所与の建設費用の下で交通の最大化が実現できる道路網、およびそのときのOD交通量を求めることは土地利用計画との整合性を方向づけることから意義が大きい。例えば、新しい道路網を計画する場合、限られた建設費用のもとで極力有効利用を図るには、どのような道路網形状と各リンク容量の種類別相対比率（以後、リンク容量パターンと呼ぶ）の組み合わせに対して、道路網全体としての処理可能交通量が最大となるか、また、最大の交通処理能力を得るためにはどのようなODパターンが整合するか、等を予め知る必要がある。既存の道路網の構成を改良する場合も、整備後の効果について同様の検討が必要である。

しかし、第2章で述べたように、ある建設費用の下で、最大となるOD交通量が出現できるようなネットワークを求めるという問題において、OD分布およびネットワークの両方が固定せず、多くの変数（例えば、ノードの個数、位置、リンクの本数および容量、ODパターン）が存在するので、数理的な方法を用いて解くことはきわめて困難である。したがって、ネットワークとOD需要のいずれか一方を固定したうえで、もう一方の最適化を求める方法が考えられる。具体的には、交通需要総量が一定であるOD分布、あるいは建設費用が一定である道路網を列挙する、の2つの方法がある。しかし、これらはいずれも膨大な作業を要する。したがって、以上のような方法は一般的な道路網形状あるいは典型的なOD分布の場合のみ応用することが可能である。

本章では、格子型、格子放射型、格子環状型の3つの道路網形状について、

リンク容量パターンの違いによる道路網交通処理能力の変化を比較分析し、また各道路網形状を効率的に利用できるようなOD交通量を明らかにし、現実の道路網計画・土地利用計画についての整合性を示すことを目的とする。

この種の従来の研究では、飯田・平本²⁾は道路網の容量と平均トリップ時間を評価基準とし、いくつかの道路網形状とODパターンとの組み合わせについて考察している。飯田・若林³⁾は道路網形状の信頼性の比較を行っている。李・飯田⁴⁾、梶谷・田村・斉藤⁵⁾は道路網容量を評価指標として道路網の形状とODパターンとの整合性を比較した。これらの研究は、道路網のリンク容量パターンを固定した上で、所与のいくつかのODパターンとの関係で考察しているのが共通の特徴である。しかし、同じ形状の道路網でもリンク容量パターンによって、交通能力が異なり、またODパターンも与えられたもの以外も存在するので、これらの研究で得られた結果は必ずしも一般性を有するとは言えない。

本章では一般性を見出すために、対象道路網のリンク容量パターンを変化させて分析している。また、ODパターンも事前に与えるのではなく、OD最大化モデルを用いて、与えられた道路網において各リンクが最も効率的に利用できるようなOD交通量（最適OD交通量と呼ぶ）を求めている。いいかえると、各道路網形状のすべてのリンク容量パターンに対して、最適OD交通量にもとづいて評価している。評価基準は、最適OD交通量となる道路網全体として処理可能な最大トリップ数を道路網の建設費用で割った投資効率とする。このように、最適OD交通量および投資効率の概念を導入することによって、リンク容量パターンと道路網形状のさまざまな組み合わせを比較・考察することが可能となる。

なお、ここでの投資効率と最適OD交通量は最大トリップ数が出現する場合のものであるので、交通需要の最も多い時間帯の道路網計画と土地利用計画の整合性の問題に対応していると考えてよい。

4.2 対象道路網の設定

4.2.1 対象道路網の形状

図4-1に示す3種類の道路網形状を対象とする。図aは格子型、図bは格子放射型、図cは格子環状型と呼ぶ。道路網の構成要素については、次のように定義する。

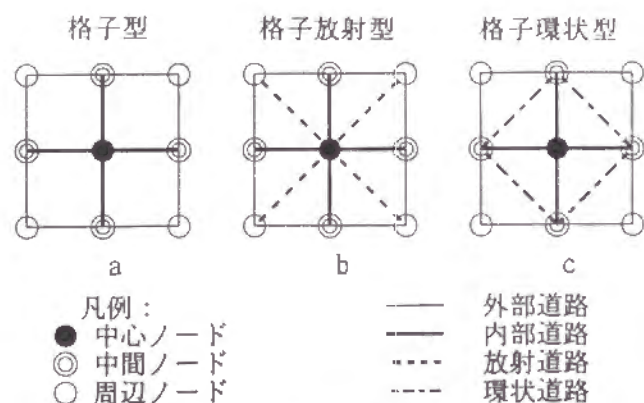


図4-1 対象道路網形状

ノードは図4-1に●, ◎, ○で示すように、3種類あり、それぞれ中心、中間、周辺ノードと位置づけることにする。リンクは、中心ノードと中間ノードを連結するリンクを内部道路と呼び、中間ノードと周辺ノードを連結するリンクを外部道路、図bにおける中心ノードと周辺ノードを直結するリンクを放射道路、図cにおける中間ノード間のリンクを環状道路と呼ぶ。リンクは方向別に設定するが、その容量は道路の種類ごとに同一であるとする。リンク走行時間関数はBPR関数(式(3.61))で与え、自由走行時間はリンク長に正比例するものとする。リンク建設費用は単位容量単位延長当たりの道路建設費用 δ にリンク容量とリンク長を乗じて与えることにする。簡単のため、 $\delta=1.0$ とする。道路網建設費用はリンク建設費用の総和とする。

4.2.2 リンク容量パターンの設定

道路網のリンク容量パターン、すなわちリンクの種類別容量の相対比を以下のように定義する。

道路網建設費用を G 、内部道路のリンク容量を C_x 、外部道路のリンク容量を C_y 、放射道路(あるいは環状道路)のリンク容量を C_z とし、それぞれの

リンク長は $1.0, 1.0, \sqrt{2}$ とする。リンク容量比を表すために、内部道路と外部道路のリンク容量の相対比を η 、放射道路あるいは環状道路に費やされる建設費用が道路網全体の建設費用に占める割合を ξ と定義する。すなわち、

$$\eta = C_x / C_y \quad \dots\dots(4.1)$$

$$\xi = 8\sqrt{2} C_z / G \quad \dots\dots(4.2)$$

ただし、式(4.2)の分子はリンク長が $\sqrt{2}$ でその容量が C_z である放射線(あるいは環状線)の往復で8本の総建設費用を表している。

こうして、 η と ξ の2つの変数を用いて、対象道路網の任意のリンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ を表すことができる。 $S(\eta, 0.0)$ は格子型道路網を意味する。 $S(\eta, \xi \neq 0.0)$ は内部道路と外部道路の容量比が η で、放射道路(あるいは環状道路)の建設費用が道路網全体の ξ 分を占める道路網である。

4.2.3 リンク容量パターンと建設費用の関係

各々のリンク容量パターンにおける投資効率を求めるために、リンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ と建設費用 G との関係を明らかにする必要がある。以下では、その関係を導出する。

道路網建設費用はリンク建設費用の総和であることから、次式で示される。

$$G = 8C_x + 16C_y + 8\sqrt{2}C_z \quad \dots\dots(4.3)$$

ただし、右辺第1項は往復で8本の内部道路の建設費用、第2項は往復で16本の外部道路の建設費用、第3項は往復で8本ある長さ $\sqrt{2}$ の放射道路(あるいは環状道路)の建設費用を表す。

リンク容量パターンの定義式(4.1)、(4.2)を式(4.3)に代入し、整理すると、種類別道路容量と総建設費用の関係が以下のように導かれる。

$$C_x = \frac{(1-\xi)\eta}{8(2+\eta)} G \quad \dots\dots(4.4)$$

$$C_y = \frac{(1-\xi)}{8(2+\eta)} G \quad \dots\dots(4.5)$$

$$C_z = \frac{\xi}{8\sqrt{2}} G \quad \dots\dots(4.6)$$

これらの式(4.4)～(4.6)を用いると、建設費用 G が与えられれば、任意のリンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ に対して各種別道路のリンク容量が計算できる。

また、任意のリンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ に対する各道路のリンク容量比は、 G と関係なしに次のように求められる。

$$C_x : C_y : C_z = \eta : 1 : \frac{(2+\eta)\xi}{(1-\xi)\sqrt{2}} \quad \dots\dots(4.7)$$

この比率は、リンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ から各種のリンク容量の大きさの関係をイメージ的に理解するのに便利である。

4.2.4 リンク容量パターンの検討対象範囲

式(4.1)、(4.2)の定義より、 $\eta \geq 0.0$ 、 $0 \leq \xi \leq 1.0$ となるのは自明である。 $\xi = 0.0$ は格子型の場合で、 $\xi = 1.0$ は放射道路（あるいは環状道路）だけからなる道路網である。この範囲の中で、あまり現実的でない道路網構成もあるので、本章では、リンク容量パターンを次のような領域に限定する。

$$S(\eta, \xi) : \quad \eta = 0.0 \sim 3.0, \quad \xi = 0.0 \sim 0.5$$

格子型の場合では、上の範囲における任意の η は1つのリンク容量パターンを表し、格子放射型あるいは格子環状型の場合では、 η と ξ の組み合わせでリンク容量パターンを表している。このとき、 η と ξ は連続値であり、その組み合わせは無限となる。しかし、本章では、計算上の都合から、 η と ξ のそれぞれに対していくつかの離散的サンプル値（表4-1）を取り、変化の傾向を見る方法を採用。

表4-1 数値計算に用いる η と ξ の値

η	0.4	0.7	1.0	1.4	2.0	2.4	2.8
ξ	0.0	0.08	0.17	0.25	0.33	0.42	

4.2.5 OD最大化モデルのパラメータ設定

OD最大化モデルのインプットとしては道路網の要素（ノード、リンク）、リンク容量、各ゾーンの開発制約（発生・集中交通量の上限値と下限値）、重力モデルのパラメータ β 、 γ がある。アウトプットは道路網全体として処理可

能な最大トリップ数を与える各ゾーンの発生交通量である。本章では、投資効率を評価するために、リンク容量は基準化された建設費用 $G=1.0$ に対して式(4.4)～(4.6)で求める。また、対象道路網は道路網形状と最大トリップ数の一般的な関係について検討するので、ゾーンの開発制約は特に設定せず、発生・集中交通量の上限値は無限大とし、下限値は0とする。なお、重力モデルのパラメータは、簡単のため、 β は0.0とし、また、 γ については、首都圏パーソンOD調査の重力モデルの値を参考にして、1.2とする⁶⁾。このように、ゾーン i からゾーン j への目的地選択確率 h_{ij} は次の式によって求められることになる。

$$h_{ij} = \frac{R_{ij}^\gamma}{\sum_j R_{ij}^\gamma} \quad \dots\dots(4.8)$$

ここに、 R_{ij} は i と j のノード間の距離（リンク長）である。

4.3 投資効率による道路網形状の比較分析

それぞれの道路網形状について、リンク容量パターンの違いによる投資効率の変化を求め、道路網形状間の比較分析を行う。

リンク容量パターンが $S(\eta, \xi)$ である道路網の投資効率を計算するには、まず η と ξ の値、および $G=1.0$ を式(4.4)～(4.6)に代入し、 $S(\eta, \xi)$ に対応する各リンクの容量を求める。そして、得られたリンク容量についてOD最大化モデルの計算を行う。このとき、建設費用 $G=1.0$ であるので、求められた最大トリップ数は投資効率を表している。

図4-2は容量パターン η に対する格子型道路網の投資効率の変化を示している。格子放射型と格子環状型の場合は η と β の2つの変数で容量パターンを表すので、投資効率は図4-3、図4-4のように2次元の等値線図で表される。効率の最大値は*で示されている。

4.3.1 最大投資効率による分析

図4-2、図4-3、図4-4の結果から、同一建設費の下でそれぞれの道路網形状に対して、どのようなリンク容量パターンで、道路網全体としての処理可能な最

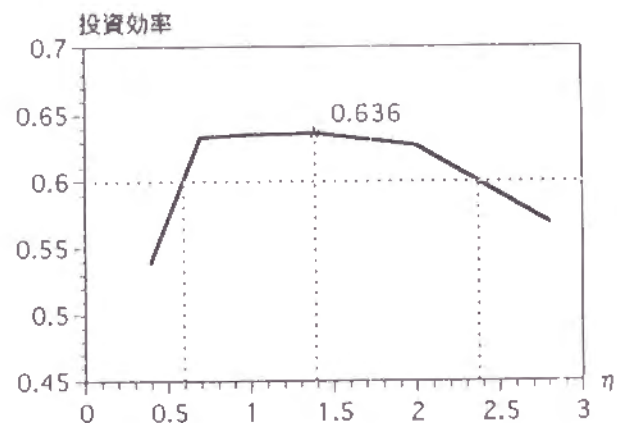


図4-2 格子型のリンク容量パターンと投資効率

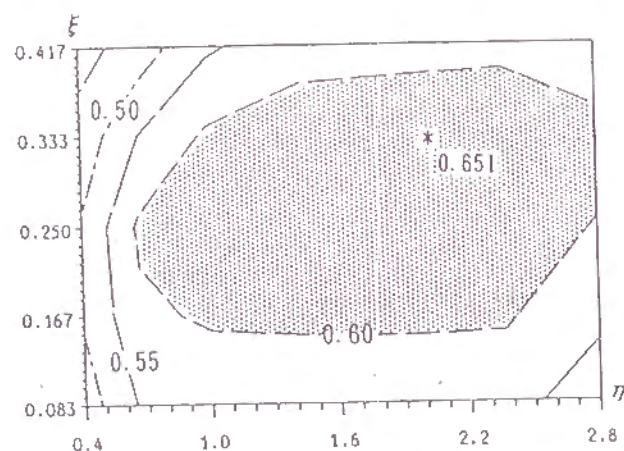


図4-3 格子放射型のリンク容量パターンと投資効率

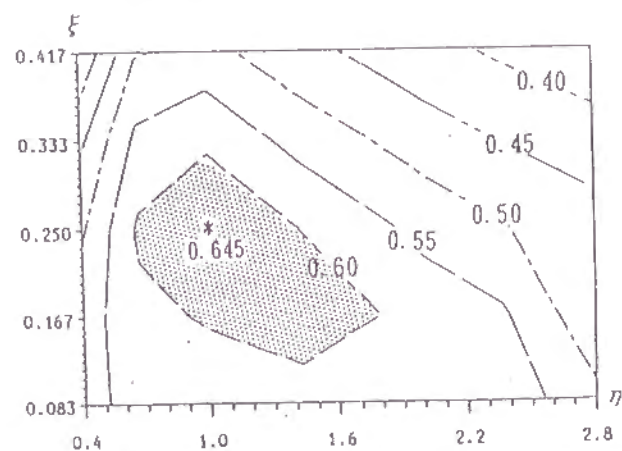


図4-4 格子環状型のリンク容量パターンと投資効率

大トリップ数が得られるか、すなわち、投資効率が最大となるかを見てみる。

図に示されているように、投資効率の最大値は、格子型では0.636、格子放射型では0.651、格子環状型では0.645となっており、ほぼ等しいと考えられる。つまり、この3種類の道路網では、最適なリンク容量パターンが与えられれば、いずれも大差のない投資効率が見られることを示している。したがって、投資効率からみれば絶対的に優位な道路網形状がないといえる。

最大の投資効率はほぼ等しくなるが、図における*印の位置から分かるように、投資効率の最大値が得られるリンク容量パターンは、道路網形状によって異なり、格子型は $S(1.4, 0.0)$ 、格子放射型は $S(2.0, 0.33)$ 、格子環状型は $S(1.0, 0.25)$ となっている。式(4.7)を用いて、これらのリンク容量パターンにおける各種リンク容量の関係をより分かりやすく表現すると、表4-2のようになる。その概ねの傾向としては、格子型と格子放射型は内部高密度のリンク容量パターンが効率的であるのに対して、格子環状型はどちらかといえば均等的な道路密度分布が効率的であるということがいえそうである。

表4-2 最大投資効率を与えるリンク容量比

	格子型	格子放射型	格子環状型
内部道路	1.4	2.0	1.0
外部道路	1.0	1.0	1.0
放射線 環状線	—	1.4	0.7

4.3.2 投資効率の安定性による分析

道路網を部分的に改良する場合を考えると、リンク容量パターンがある程度変化しても、高い投資効率を保持できるような安定性のある道路網が望ましい。ここでは、投資効率の変化が最大値の一割程度以内に収まることを一応の目安として、等投資効率線0.60以上のリンク容量パターンの範囲を投資効率の安定範囲と見なすことにする。格子型の安定範囲は図4-2において投資効率が0.60以上となる η 軸の範囲で、格子放射型と格子環状型は図4-3、図4-4における網掛けの部分で示されている。

格子型の場合（図4-2）では、格子放射型（格子環状型）と同じ $\eta=0.4\sim2.8$ の対象範囲でみれば、投資効率が0.60以上のリンク容量パターンは $\eta=0.6\sim2.4$ の範囲となっており、対象範囲の75%を占めている。格子放射型の場合も（図4-3）、安定範囲の面積が大きく、 η と ξ の対象範囲の75%以上を占めている。それに比べると、格子環状型の安定範囲が小さくなっていることが図4-4から分かる。つまり、格子型および格子放射型は投資効率が最大となるリンク容量パターンからかなり異なっても、高い効率が得られるが、格子環状型は限られた狭い範囲のリンク容量パターンにしか高い投資効率が得られない。要するに、投資効率の安定性は格子型、格子放射型はかなり高いが、格子環状型は相対的に劣ることを表している。

格子型の安定性が高いのは建設費用が一定の下で、格子型はボトルネックが生じにくいからである。つまり、 η が大きい時、ノード間の交通量はより高い容量をもつ内部道路を選択すればよいし、逆の場合は外部道路を選択すればよい。格子放射型と格子環状型の場合をみると、建設費用一定の下で、放射道路あるいは環状道路を作ることによって、各種道路のリンク容量が小さくなるので、どのリンクでも格子状の場合よりボトルネックになりやすくなる。しかし、放射道路は最も遠いノード間の交通を直結することによって、格子放射型道路網の投資効率をアップさせる機能がある。これは格子放射型の投資効率の安定性が格子環状型より高くなっている理由と思われる。

4.3.3 平均トリップ走行時間による分析

投資効率は道路網の建設費と交通処理能力の関係を表しているため、計画主体側からみた指標と考えられる。利用者側からみれば、所要時間の短い道路網が望ましい。そこで、それぞれの道路網形状のトリップ平均所要時間を比較してみる。

前述のように、本研究では、計算の都合から、 η と ξ のそれぞれにいくつかのサンプルを取り、その組み合わせについてOD最大化モデルを適用している。それぞれの組み合わせの最適OD分布でのトリップ平均所要時間をまず計算し、さらにすべての組み合わせでのトリップ平均所要時間の平均値および安定範囲での平均値を計算した。その結果を表4-3に示す。

表4-3 平均トリップ所要時間

	全組み合わせ	安定範囲
格子型	51.8	50.1
格子放射	43.5	40.6
格子環状	44.6	42.3

表から分かるように、全組み合わせからみても、安定範囲からみても、格子放射型と格子環状型の平均所要時間はほぼ等しいのに対して、格子型の平均所要時間が一段と高くなっている。これは格子放射型と格子環状型はノード間における直結リンクが多く、これに比べて格子型の場合は直結リンクは少ないからである。したがって、格子放射型と格子環状型は道路網全体の平均トリップ所要時間が小さくなるのは明らかである。

以上のことからリンク容量パターンと投資効率の関係は次のようにまとめられる。格子型は高い投資効率を保証し、安定性もあるが、平均所要時間が長いことが欠点である。格子環状型は平均所要時間は短い、狭い範囲のリンク容量パターンにしか高い効率が得られないことが欠点である。これらに対して、格子放射型は安定性も高く、平均所要時間も短いので、計画主体と利用者の両者から見て、最も望ましい道路網形状といえそうである。

4.4 道路網形状と最適OD交通量の関係

本節では、最適OD交通量におけるノード発生・集中交通量（最適発生・集中交通量）を用いて、それぞれの道路網形状にどのような発生および集中交通量のパターンが整合するかを考察する。なお、図および説明を簡単にするために、次の記号および用語を用いる。

G1, A1 : 中心ノードの発生, 集中交通量

G2, A2 : 中間ノードの発生, 集中交通量

G3, A3 : 周辺ノードの発生, 集中交通量

発生交通量比 : G1 : G2 : G3

集中交通量比: $A1:A2:A3$

投資効率が得られたときの各ノードの最適発生・集中交通量は小さすぎるので、それを100倍拡大して考察する。このときは、建設費用 $G=100$ ときの最適発生・集中交通量と考えてよい。

4.4.1 格子状道路網

図4-5は格子型と整合する最適OD交通量の発生・集中交通量がリンク容量パターン η によってどのように変化するかを描いている。

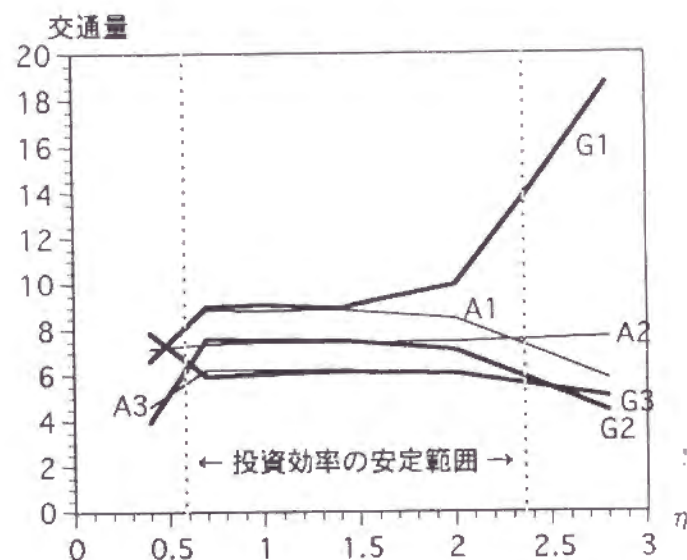
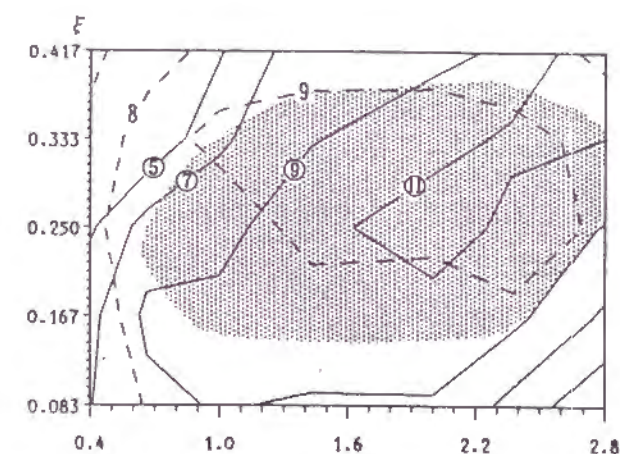


図4-5 格子型道路網の最適発生・集中交通量

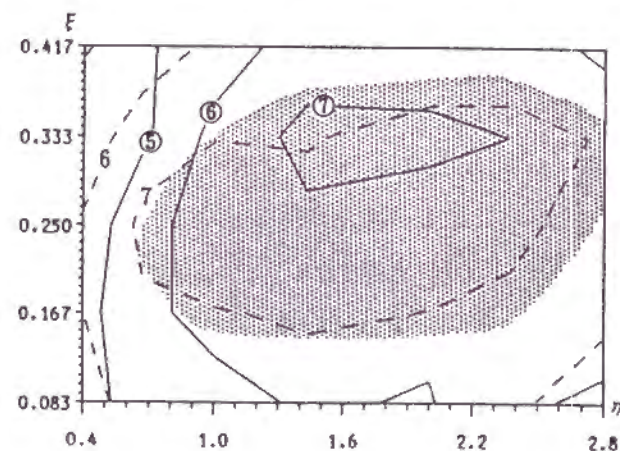
安定範囲である $\eta=0.6\sim 2.4$ で見ると、そのほとんど ($\eta=0.6\sim 2.0$) が $G1=A1$, $G2=A2$, $G3=A3$, $G1(A1)>G2(A2)>G3(A3)$ となっている。すなわち、格子型道路網の場合、投資効率の高いリンク容量パターンの安定範囲内では、ノードの発生・集中交通量が等しく、しかも発生・集中交通量がともに中心から周辺へ逓減するODパターン(発生交通量比と集中交通量比はともに1.5:1.2:1)が適していることが読み取れる。

4.4.2 格子放射型道路網

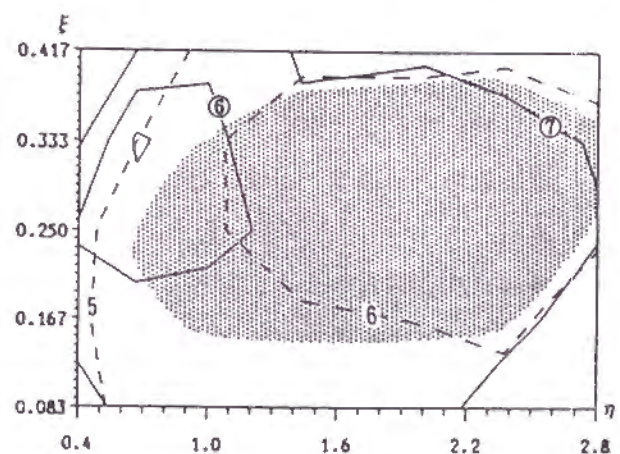
図4-6(a), (b), (c)は格子放射型と整合する最適発生・集中交通量の等値線をリンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ の平面上に表したものである。図の中で、発生



(a)中心ノード



(b)中間ノード



(c)周辺ノード

図4-6 格子放射型道路網の最適発生・集中交通量

交通量は実線，集中交通量は点線で表されており，図(a)，(b)，(c)はそれぞれ中心，中間，周辺ノードの最適発生・集中交通量を表している。リンク容量パターン $S(\eta, \xi)$ に対する最適OD交通量は，これらの図における同一座標点 (η, ξ) のそれぞれの最適発生・集中交通量から求められる。図の網掛けの部分は前述の投資効率の安定範囲を示している。この安定範囲における最適発生・集中交通量を以下で考察する。

各図の実線で示される発生交通量の大きさを対比してみよう。安定範囲内において，中間ノードの発生交通量（図(b)）はほぼ6～8の間にあり，周辺ノード（図(c)）はほぼ5～7の間にあり，両者の差は小さい。これに対して，中心ノードの発生交通量（図(a)）は変化が大きい（7～13）。つまり，格子放射型においては，一般的な傾向として，中心部の発生交通量が高くて周辺部が均等である交通需要パターンが適合することがわかる。また， η と ξ が大きくなるほど中心高密度の需要パターンが望ましくなる。例えば， $S(1.0, 0.167)$ のときの発生交通量比は9:6:6（すなわち1.5:1:1）であるが， $S(2.4, 0.333)$ のときは12:6:7（すなわち2:1:1.1）となる。この理由は η と ξ が大きくなるほど中心部の道路密度が高いからであり，当然のことといえるかも知れない。

集中交通量比（図4-6(a)，(b)，(c)の点線部分）は等値線の値をとると概ね9:7:6となり，単位化すると1.5:1.2:1になっている。言い換えれば，格子放射型の場合，集中交通量が中心から周辺へ向かって漸減するような分布パターンが適合するといえる。

4.4.3 格子環状型道路網

図4-7(a)，(b)，(c)はそれぞれ格子環状型と整合する中心，中間，周辺ノードの最適発生交通量（実線）と最適集中交通量（点線）の等値線をリンク容量パターン平面に表したものである。

中間ノードと周辺ノードの最適発生交通量の変化の様子（図(b)と図(c)）は等値線の間隔が多少異なるものの，傾向は似ていると考えられる。これに対して，中心ノードの最適発生交通量（図(a)）はリンク容量パターンの変化に対して感応度が高く，大きな変化（5～21）を示している。格子放射型と同様に中心部の発生交通量が高くて，周辺部が低密で均等な交通需要分布が適合するが，

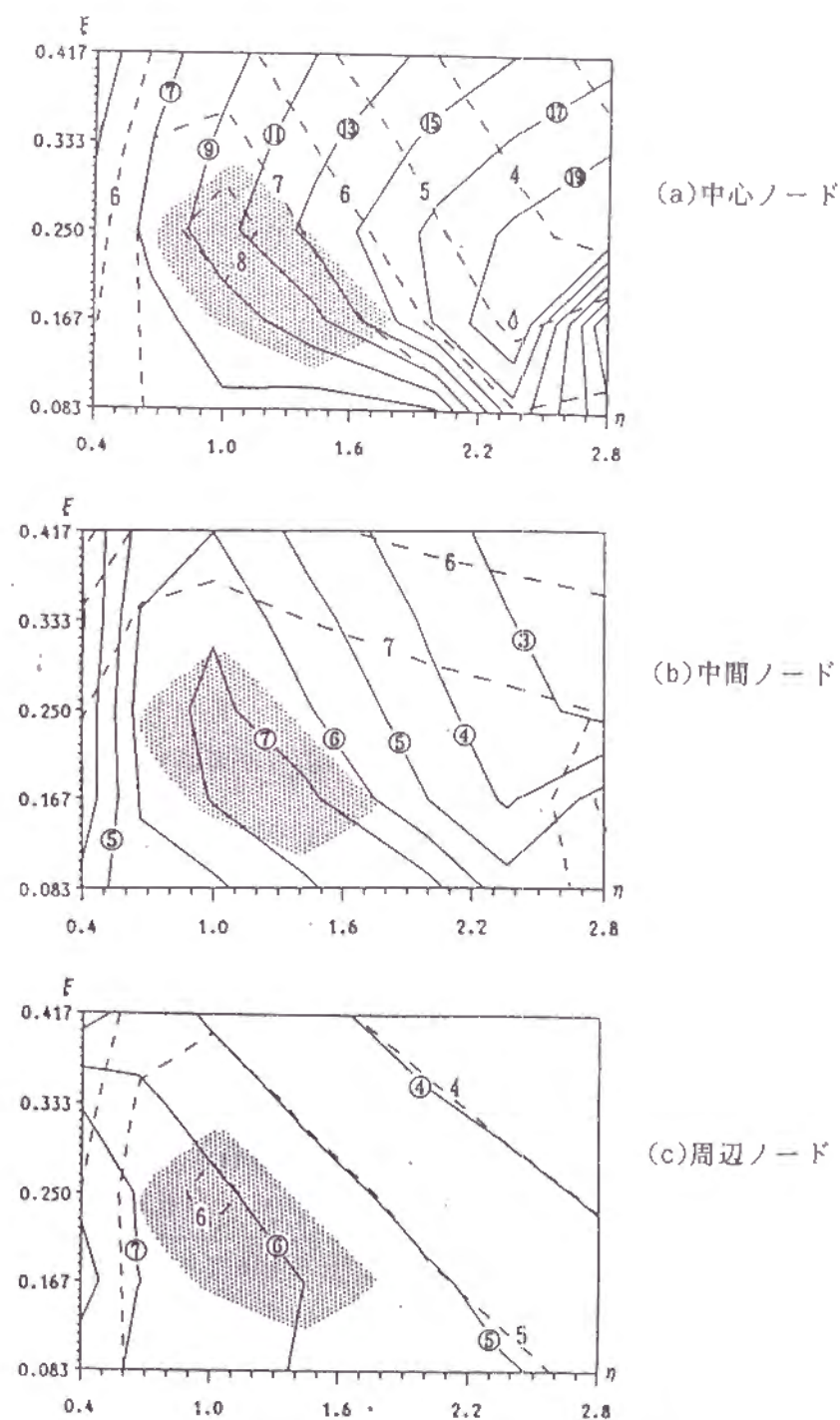


図4-7 格子放射型道路網の最適発生・集中交通量

中心部がより一層高密度となる。例えば、S(2.4, 0.333)の発生交通量比は17:3:4（すなわち5.7:1:1.3）で、中心部の密度が周辺部のそれに対して約4倍になっている。

集中交通量の場合（点線）をみると、 η と ξ の小さいエリアでは、どのノードの最適集中交通量も7の近傍になっており、より均等的な集中交通量分布パターンが適合することがわかる。 η と ξ が大きくなるほど中間ノードの集中量が高くなる。例えば、S(2.4, 0.333)での集中交通比は4:6.5:4（すなわち1:1.6:1）となっている。

各種の道路網形状に対する最適OD交通量をまとめると、表4-4のようになる。格子型道路網ではノードの発生交通量と集中交通量が等しいOD分布パターンが望ましく、どのゾーンの発生・集中交通量も均等となるように土地利用を誘導するのがよいと思われる。格子放射型と格子環状型の発生交通量からみると、両者ともに中心部高密度で周辺部が低密度均等の分布が適合するが、格子環状型はさらに中心部高密度型が顕著となる。したがって、環状型の道路網は一極集中型の土地利用分布に適合する利点があることが分かった。一方、集中交通量からみれば、格子放射型は格子型と同様に中心部から周辺部へと漸減する分布が望ましいのに対して、格子環状型は中間部が高密度となる。

表4-4 道路網形状と最適発生・集中パターン

	発生（交通量比）	集中（交通量比）
格子型*	中心から周辺へ 漸減(1.5:1.2:1)	中心から周辺へ 漸減(1.5:1.2:1)
格子放射型*	中心高密度、周辺 均等的(1~2:1:1)	中心から周辺へ 漸減(1.5:1.2:1)
格子環状型	中心高密度、周辺 均等的(1~5:1:1)	中間高密度

* リンク容量パターンが安定範囲にある場合

4.5 結語

本研究では、OD最大化モデルを用いて、リンク容量パターンに対応した最大トリップ数を求め、格子型、格子放射型、格子環状型の道路網形状について、投資効率とリンク容量パターンの関係を明らかにした。そして、各道路網形状に整合するようなODパターンを明らかにした。主な結論は以下のようにまとめられる。

- ①最適なリンク容量パターンを採用すれば、どのような道路網形状でも大差のない投資効率が得られる。つまり、投資効率からみれば絶対的に優れた道路網形状は存在しない。
- ②格子型と格子放射型は内部高密度のリンク容量パターンが効率的であるのに対して、格子環状型は均等なリンク容量パターンが効率的である。
- ③格子型は投資効率が高く、その安定性もあるが、平均所要時間が長いことが欠点である。格子環状型は平均所要時間は短い、高い投資効率が得られるのは限られた狭い範囲のリンク容量パターンに対してのみである。これらに対して、格子放射型は投資効率の安定性も高いし、平均所要時間も短いので、計画主体と利用者の両者から見て、望ましい道路網形状といえそうである。
- ④発生交通量からみると、3種類の道路網形状はともに中心部高密度の分布が適合するが、格子環状型はさらに中心部高密度型の分布となる。
- ⑤集中交通量からみれば、格子放射型は格子型と同様に中心部から周辺部へと漸減する分布が良いのに対して、格子環状型は中間ノードで高密度分布となる。

以上の結論は、抽象化した道路網条件と単純な交通需要関数にもとづくモデル計算によって導かれたものであり、必ずしも一般性を有するとは言えない面がある。現実の道路網計画と土地利用計画に適用するためには、さらに具体的に詳細な検討をする必要があろう。

参考文献

- 1) 飯田恭敬・李燕(1993): 道路網計画からみた土地利用と交通流動の整合性,

- 2) 飯田恭敬・平本健二(1979): 道路網計画と土地利用パターンの整合に関する考察, 土木学会論文報告集, 第291号, pp. 119-128.
- 3) 飯田恭敬・若林拓史(1988): ODパターンと道路網形状の相違による道路網信頼性のマクロ考察, 交通工学, Vol. 23, No. 3, pp. 9-19.
- 4) 李燕・飯田恭敬(1992): 道路網容量からみたODパターンと交通ネットワークの適合性, 第47回年次学術講演会講演概要集, pp. 286-287.
- 5) 榊谷有三・田村亨・斉藤和夫(1993): 道路網容量からみた道路網形態と土地利用パターンの整合性について, 1993年度第28回日本都市計画学会学術研究論文集, pp. 337-342.
- 6) 山形耕一・森地茂(1992): 新体系土木工学60・交通工学, p. 123.

第5章 OD最大化モデルの 京都市への適用

本章では, 与えられた道路網と整合するOD交通量および最大トリップ数を求めるOD最大化モデル(第3章)を用いて, 京都市の現状および将来道路網に対して, 土地利用から道路網への整合の観点から, 道路網を有効に利用するためにとるべき土地利用分布について考察する。

以下, 5.2においては, 現状道路網から対象道路網を抽出し, その抽象化された道路網に用いるデータの加工, すなわちOD交通量の集計・修正をし, さらに現実の交通状態を反映した交通流を再現するために対象道路網とOD表の調整を行う。5.3では, 京都市の道路網・土地利用に関する将来計画を紹介して, 本研究で検討するケースを設定する。5.4では, それぞれのケースについてOD最大化モデルを適用する。

5.1 対象道路網とODデータ

現実の道路網における交通状況を反映できるような対象道路網およびOD交通量を求めるために, 図5-1のような流れで作業する。作業は大きく2段階からなる。道路網形状およびOD表を実データから抽象化・集約化して導く作業(図中の点線の上の部分)と, 1車線当たりの交通容量を変化させて配分することによって対象道路網とOD表をマッチさせる作業(点線の下の部分)に分けられる。現状道路網から研究対象道路網を抽象化する作業は5.1.1で説明する。原始のODデータから対象道路網に対応するようなOD表の推定は5.1.2で述べる。5.1.3では, OD表の修正に関わる重力モデルのパラメータの推定方法について説明する。交通量配分によるOD表と対象道路網の調整は5.1.4で説明する。

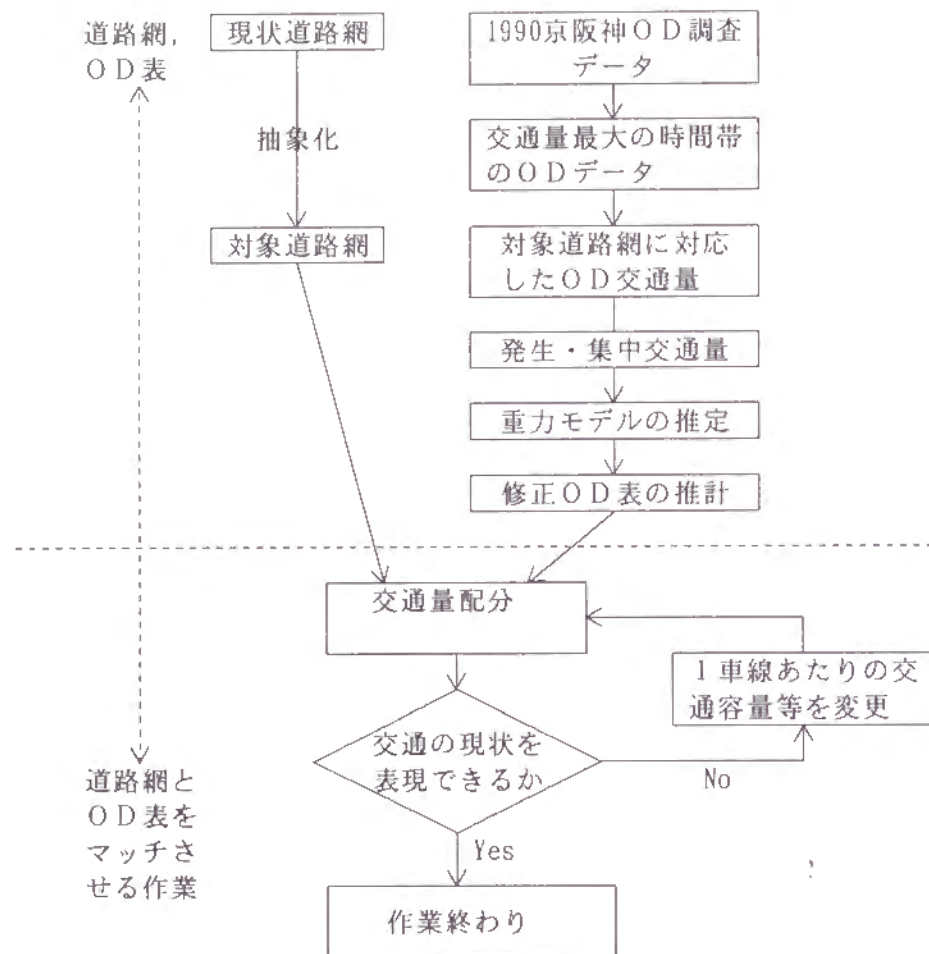


図5-1 作業の流れ

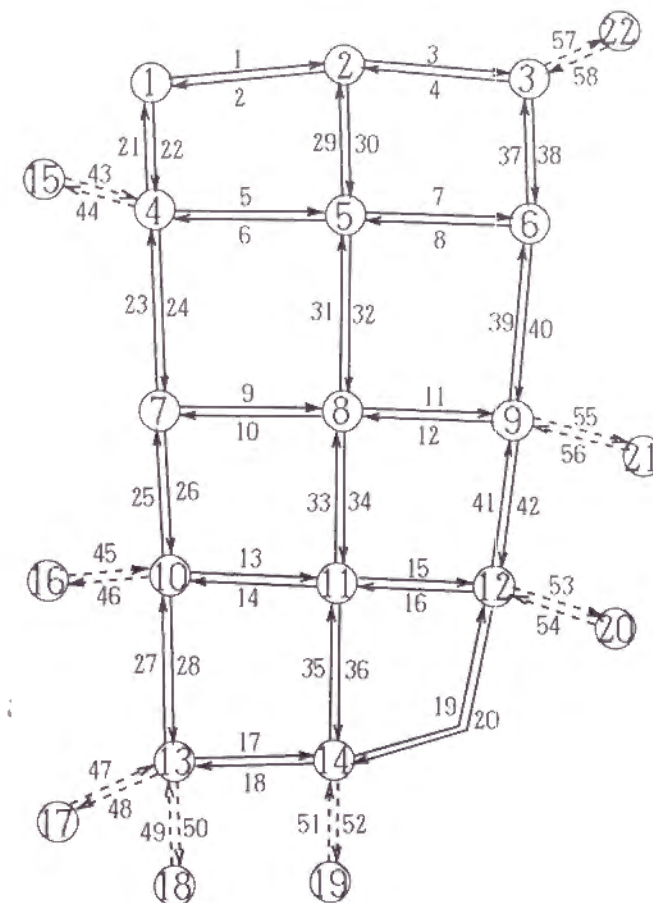


図5-2 対象道路網

5.1.1 対象道路網

京都市において実際に存在する道路は数えられないほど多いので、研究目的に応じて集約、抽象化する必要がある。本研究の目的は京都市の土地利用計画に方向性を示すことであり、さらに道路網の規模が大きくなるとOD最大化モデルの計算費用が激増するため、計算対象道路網は簡潔なものが良い。このような状況の下で、京都市道路網の格子形状を生かして、南北方向で平行する主要道路を3本に、東西方向で平行する主要道路を5本にまとめ、図5-2のようにノード数が22、リンク数は58の道路網に抽象化する。

22個のノードの中で、京都市内の各ゾーンを代表するノード1～14を域内ノードと呼ぶ。これらのノードの実際の行政区、市街地との対応関係は図5-3に示す。域内ノード以外の8個のノードは域外ノードと呼び、それぞれが代表する地域は表5-1で示す。域外ノードを8個としたのは京都市につながる主要な地域間道路は8本であるからである。

対象道路網のリンクと現実の道路との関係は表5-2に示している。リンク容量はそのリンクが代表している複数の道路の車線数の和とする。域内リンクの長さは代表する道路間の距離とし(表5-3)、域外ノードを起終点とするリンク(リンク43～58)は域内のリンク間の距離に比べ、はるかに長いので、無

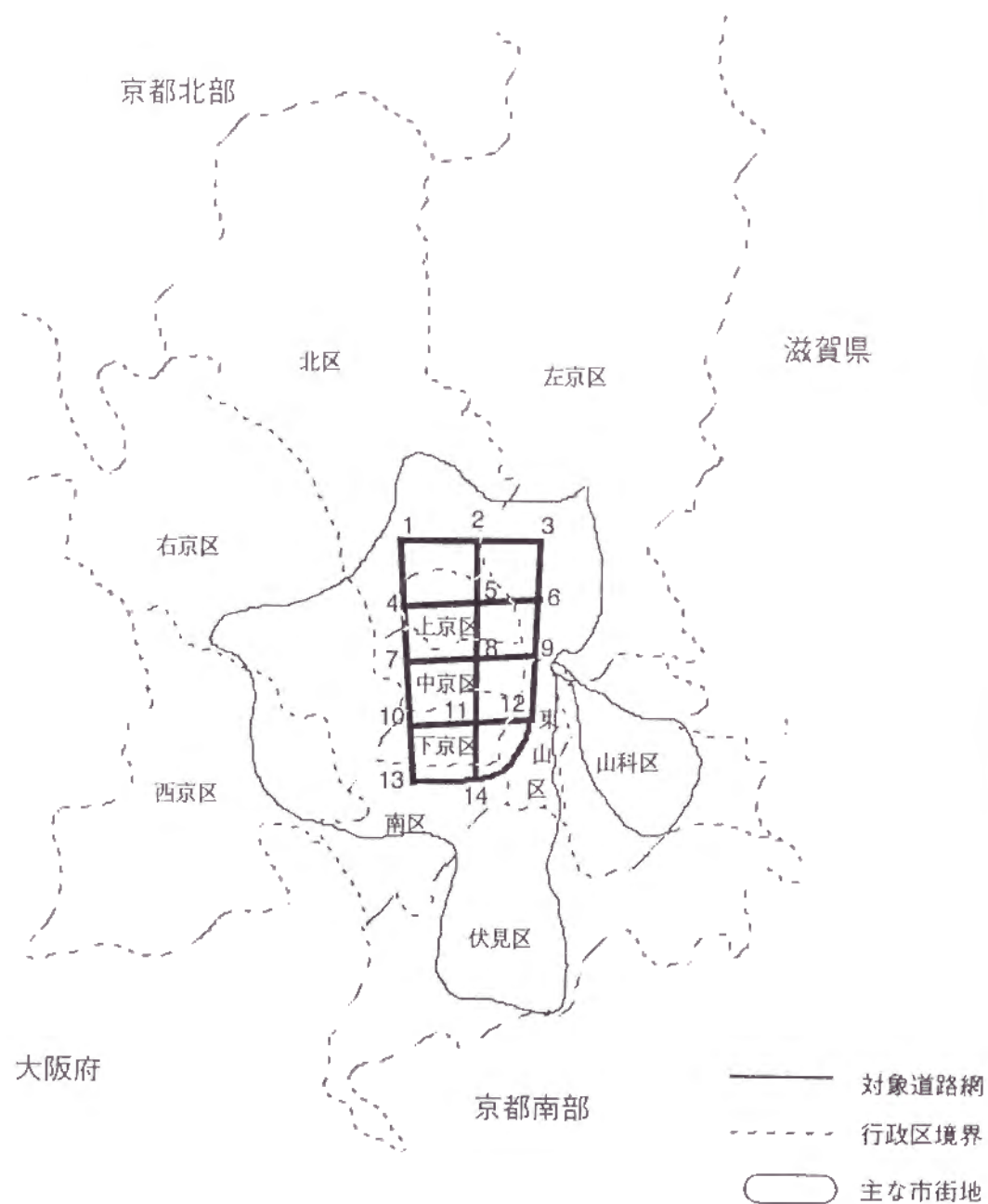


図5-3 対象道路網と行政区の関係

表5-1 域外ノードが代表する地域

ノード番号	代表する地域
1 5	京都府北部
1 6	京都府北部, 兵庫県
1 7	乙訓 3 市町, 大阪府/市, 兵庫県
1 8	京都府南部, 奈良県, 和歌山県, 大阪府/市
1 9	京都府南部, 奈良県, 和歌山県
2 0	滋賀県
2 1	滋賀県, 滋賀県以東
2 2	京都府北部, 滋賀県以東

表5-2 対象道路網のリンクと対応する現実の道路

	リンク	車線数	代表する道路名 (片側車線数)
域内	東	1~4	北大路(2), 北山通り(2)
		5~8	今出川通り(2), 丸太町通り(2)
		9~10	四条通り(2), 御池通り/三条通り(1)
		11~12	御池通り(3), 四条通り(2)
		13~14	五条通り(2), 七条通り(2)
		15~16	五条通り(4), 七条通り(2)
		17~18	九条通り(2), 十条通り(2)
	西	19~20	九条通り/東大路(2)
		21~26	西大路(2), 千本/大宮通り(2), 国道162(1)
		27~28	西大路(2), 千本/大宮通り(2)
		29~30	烏丸通り(2), 堀川通り(3), 河原町通り(2)
		31~34	烏丸通り(2), 堀川通り(4), 河原町通り(2)
		35~36	烏丸通り(2), 堀川通り(3), 河原町通り(1)
		37~38	東大路(2), 北白川通り(2), 川端通り(1)
域外	北	39~42	東大路(2), 川端通り(2)
		43~44	国道162号線 (1)
		45~46	国道9号線 (1)
		47~48	国道171号線 (2)
		49~50	国道1号線 (2)
		51~52	国道24号線 (2)
		53~54	国道1号線 (2)
	南	55~56	四ノ宮四ツ塚線 (1)
		57~58	国道367号線 (1)

表5-3 域内道路のリンク長

リンク番号	リンク長 (m)
1, 2	2,028
3, 4	2,246
5, 6	1,872
7, 8	1,778
9, 10	1,810
11, 12	1,716
13, 14	1,716
15, 16	1,409
17, 18	1,560
19, 20	2,558
21, 22	1,934
23, 24	1,685
25, 26	1,716
27, 28	1,810
29, 30	2,184
31, 32	1,685
33, 34	1,778
35, 36	1,778
37, 38	1,966
39, 40	1,622
41, 42	1,872

限大とする。リンク走行時間関数はBPR関数（式(3.61)）とし、自由走行時間はリンク長を自由走行速度(50Km/h)で除したものとする。

5.1.2 ODデータ

ODデータは1990年京阪神パーソントリップ調査のデータをベースにする。このデータは京都市を56ゾーン、域外の地域（ノード16～22に相当する地域）を10ゾーンに分けている。有効データ18,527,898トリップの中のゾーン間交通（2,258,724トリップ）を見ると、その総量および内訳の時間的推移は図5-4に示す通りである。交通量の最も高い8:00-9:00（通勤時間帯）を対象として、原始OD表を集計する。しかし、原始のODデータは京都市を56ゾーンに分割

しているので、上に示した対象道路網に適用するには集約化が必要である。ここでは、ゾーン内では単位面積当たりの発生・集中率は一様であるとして、原始ゾーンと集約ゾーンの面積に基づいて、原始のODデータから対象ネットワークに対応するようなOD表（表5-4）に変換する。

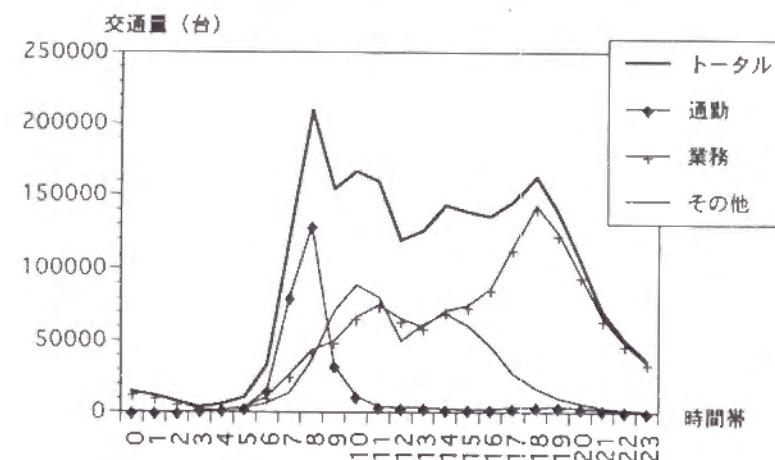


図5-4 OD交通量の時間的推移

しかし、この表は対象道路網に対応するようなOD表としては2つの問題点がある。1)OD表の中で交通量が0となっているODペアが多数存在する。これは元々の交通需要が小さいので、ほかの地域の交通量と比較して無視しても構わない場合もある一方、調査のミスや漏れも考えられる。2)OD表の中で、域外ノード間の交通は必ずしも全てが京都市を通過するものではない。計算に用いる集約OD表に上げられる交通は、すべて対象道路網に配分されてしまうから、京都市内を通行しない交通量を前もって除去しておく必要がある。また、本研究は域内ゾーン間交通を中心とする研究であるから、域内ノードの内々交通をどのように表現するかも設定しておく必要がある。

域内ゾーンの内々交通については、簡単のため、対象道路網にまとめられていない詳細な道路を利用すると仮定し、OD表には0とする。

通過交通に関しては、具体的なデータがないため、本研究では、通過交通が多いと思われるノード16, 17, 18, 19, 20相互間の通過交通だけを考慮し、予めそれにかかわるリンクを特定して、通過交通量の分だけリンク容量を小さくする。具体的にどれだけのリンク容量を除くかについては5.1.4における道路網とOD

表5-4 原始ODデータから集約したOD表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	757	603	156	538	401	109	615	308	117	272	158
2	598	747	357	466	306	102	223	274	118	248	174
3	467	659	2572	324	571	643	440	494	324	309	307
4	517	352	104	624	499	75	524	386	50	196	248
5	145	52	103	525	563	193	89	258	75	0	220
6	137	153	616	195	106	563	262	224	296	163	124
7	661	212	211	1006	382	246	3764	911	258	2184	663
8	105	134	83	93	76	134	542	874	392	152	701
9	169	193	375	25	198	437	542	454	479	368	181
10	359	183	265	440	367	202	2090	525	229	816	672
11	22	16	49	175	164	203	296	955	332	170	917
12	208	176	358	219	181	178	578	612	429	780	474
13	230	135	238	576	399	259	908	380	207	1571	706
14	100	58	110	140	138	115	665	330	155	781	492
15	56	63	154	70	40	67	251	101	167	187	34
16	32	30	20	18	40	15	65	58	7	28	7
17	41	39	25	18	40	15	71	87	7	36	15
18	78	47	42	189	21	81	560	168	67	31	159
19	64	117	140	153	216	190	432	213	59	41	160
20	32	108	136	54	195	99	193	149	59	33	117
21	24	32	133	52	0	51	185	42	50	17	26
22	24	32	133	52	0	51	185	42	50	35	26
D	4076	3404	3818	5335	4343	3484	9727	6980	3456	7608	5674

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	O
145	508	198	71	30	30	54	40	20	41	41	4464
213	544	194	36	17	17	34	0	0	19	19	3968
190	678	327	0	0	0	68	34	34	0	0	5873
55	318	37	35	13	13	20	40	20	21	21	3551
30	245	44	9	0	0	0	34	34	9	9	2080
150	378	144	40	11	11	137	11	11	28	28	3234
224	1810	472	84	64	64	259	171	49	20	20	9978
418	240	103	30	0	0	16	73	57	30	30	3418
245	465	122	129	11	11	76	31	31	28	28	4127
458	2818	417	253	11	11	55	165	110	27	85	9748
393	232	94	12	0	0	40	56	16	12	12	3258
386	1031	198	167	0	0	138	26	26	27	27	5840
220	4853	633	181	29	27	601	335	232	73	73	8022
252	1288	470	112	5	5	103	38	38	27	27	4986
232	324	117	27649	8229	8419	604	548	78	19483	19483	58719
21	136	59	8235	8224	8382	386	357	29	40	40	18016
21	82	59	8420	8389	63901	59355	59410	132	67	67	136406
205	1243	152	721	379	59074	202007	201504	3284	364	364	268749
63	720	217	949	461	59245	202617	286254	67499	17348	17348	368261
22	580	135	220	59	157	4287	68649	64532	168	168	75628
26	113	18	19495	58	89	226	17033	51	36301	36301	74034
26	113	18	19495	58	89	226	17033	51	36301	36301	74052
3621	13875	3766	58706	17829	135651	269306	365596	71810	74143	74201	1146406

表の調整において述べる。

OD表の修正に関しては、表5-5に示すように修正する。すなわち、域内ゾーン間の交通および域外から域内への交通はゾーン間の距離および目的ゾーンの吸引力によって決められる、すなわち重力モデルに従うと仮定する。域外ノード間の交通（通過交通）に利用されるリンク容量は対象ネットワークから除外

表5-5 OD表の修正方法

D	域内ノード(1~14)	域外ノード(15~22)
O		
域内	$X_{ij} = O_i \frac{D_j^\beta t_{ij}^{-\gamma}}{\sum_j D_j^\beta t_{ij}^{-\gamma}}$ ($\gamma=1.0, \beta=0.8$)	$X_{ij} = Y I_i * \frac{Y J_j}{TOT}$ ($i=1, 14, j=15, 22$)
域外	$X_{ij} = O_i \frac{D_j^\beta}{\sum_j D_j^\beta}$ (吸引だけに依存)	0.0 (通過交通を リンク容量から除く)

ただし、 X_{ij} はゾーン*i*から*j*への交通量で、 $Y I_i = \sum_{j=15, 22} X_{ij}$,
 $Y J_j = \sum_{i=1, 14} X_{ij}$, $TOT = \sum \sum X_{ij}$ ($i, j=15, 22$) とする。

し、OD表においてその交通量は0.0とする。域外から域内への交通量も重力モデルで与えられるものとするが、距離が長いので、目的地選択確率はゾーンの吸引力だけに依存して定まることとなる。重力モデルでとらえにくい域内から域外への交通は現状の比例および平均パターンで与える。重力モデルのパラメータに関しては、次項5.1.3の方法で推定する。

修正後のOD表を表5-6に示す。表から分かるように、OD交通量が0.0であったところは目的地の距離および吸引力によって修正された。修正後のOD表と原始ODデータから集約したOD表（表5-6）との相関関係を図5-5に、修正前後の各ノードの集中交通量間の相関関係を図5-6に示す（5.1.3で説明するが、ノードの発生交通量は修正前後は等しいので、その相関は示す必要がない）。いずれも良好な相関関係があるので、修正後のOD表は現実のOD表の性質を

表5-6 修正後のOD表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	486	261	701	291	162	596	300	129	368	192
2	554	0	445	306	454	205	342	377	147	238	215
3	463	692	0	381	467	730	478	484	405	361	312
4	392	150	120	0	357	150	774	281	106	349	160
5	113	155	102	249	0	176	212	332	93	130	134
6	135	149	341	223	374	0	252	293	341	178	166
7	541	272	245	1257	495	275	0	1405	408	1787	617
8	118	130	107	198	335	139	608	0	274	286	389
9	122	123	217	181	227	391	427	663	0	274	289
10	342	194	189	580	311	200	1830	678	268	0	1151
11	86	85	79	129	156	90	306	446	137	558	0
12	150	142	208	211	231	264	453	520	501	640	983
13	260	162	173	386	241	177	908	472	228	1611	603
14	116	107	112	161	170	121	343	370	168	471	617
15	104	90	99	129	110	92	209	160	91	172	136
16	30	26	28	37	32	26	61	46	26	50	39
17	31	27	29	39	33	27	63	48	27	51	41
18	171	148	162	212	179	150	343	263	149	281	222
19	156	135	148	193	164	137	313	240	136	257	203
20	107	92	101	133	112	94	215	164	93	176	139
21	43	37	41	53	45	39	87	66	38	71	56
22	44	38	42	55	46	39	89	68	39	73	57
D	4086	3448	3258	5823	4841	3694	8917	7684	3816	8392	6734

	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	O
113	422	107	67	11	11	93	61	39	21	24	4465	
121	300	113	29	4	4	40	27	17	9	10	3969	
277	497	184	27	4	4	38	25	16	8	10	5873	
88	350	83	38	6	6	52	34	22	12	13	3551	
67	152	61	20	3	3	27	18	11	6	7	2080	
165	238	93	57	9	9	78	52	33	18	20	3234	
309	1336	288	150	25	24	206	136	87	47	55	9976	
153	301	134	49	8	8	67	44	28	15	17	3418	
358	352	148	71	11	11	98	64	41	22	26	4127	
447	2426	405	147	24	24	202	133	86	46	53	9746	
333	440	257	31	5	5	42	28	18	9	11	3258	
0	745	373	84	14	13	116	76	49	26	30	5839	
346	0	893	318	53	52	437	288	186	100	116	8021	
303	1564	0	73	12	12	100	66	42	23	26	4986	
95	278	98	0	0	0	0	0	0	0	0	1870	
27	81	28	0	0	0	0	0	0	0	0	543	
28	83	29	0	0	0	0	0	0	0	0	562	
155	455	160	0	0	0	0	0	0	0	0	3057	
142	416	146	0	0	0	0	0	0	0	0	2790	
97	285	100	0	0	0	0	0	0	0	0	1916	
39	115	40	0	0	0	0	0	0	0	0	777	
40	118	41	0	0	0	0	0	0	0	0	795	
3713	10965	3793	1167	194	192	1604	1058	681	369	427	84861	

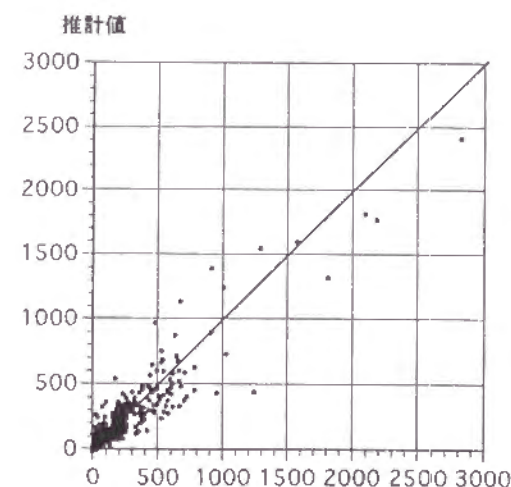


図5-5 OD交通量の相関(R=0.93)

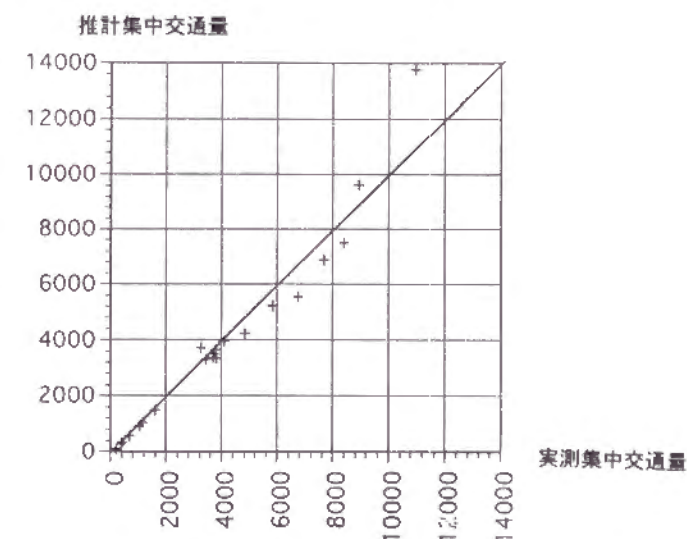


図5-6 集中交通量の相関(R=0.98)

失っていないことが確認できる。

修正後の各ノードの発生・集中交通量の分布は図5-7、図5-8で示す。図5-9は各ノードの発生・集中交通量の大きさを比較するために、その大きさを同心円で表したものである。8:00~9:00の通勤時間の発生交通量は主として住宅立地、集中交通量は勤務地の立地と関係があるとすると、これらの図から、(1)発生交通量（住宅地）は周辺のノードが多いに対して、集中交通量（勤務地）は中心

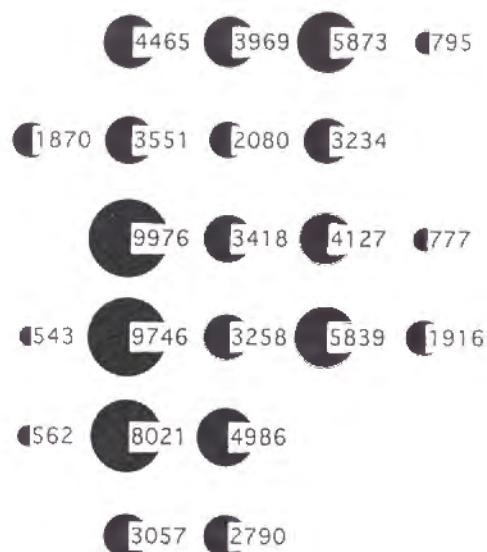


図5-7 発生交通量（現状）

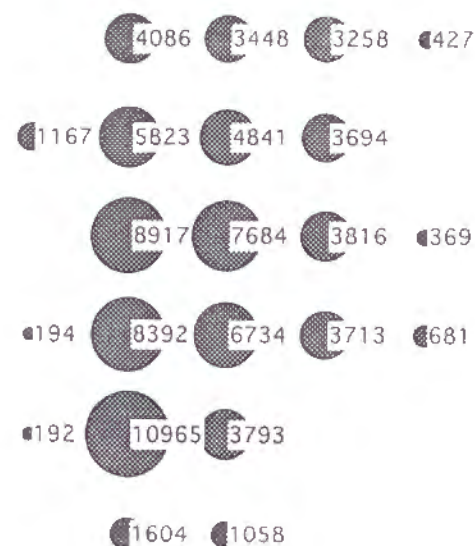


図5-8 集中交通量（現状）

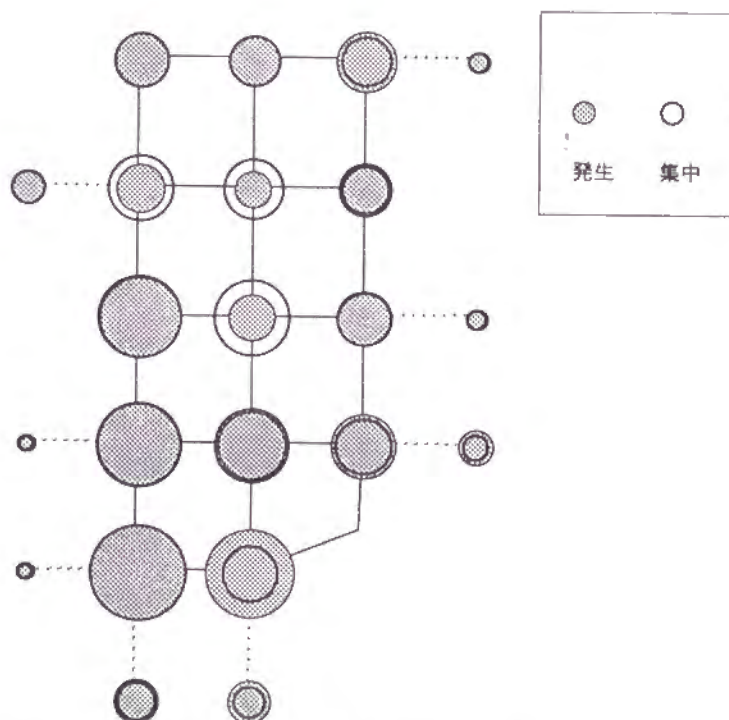


図5-9 ノード発生交通量の比較（現状）

部のノードが多い、(2)域外から域内への交通量は域外への交通量より大きい、すなわち京都市はある程度地域の中心である、という特徴が分かる。これらは京都市の全体の通勤時間帯の交通分布の特徴がよく反映できていると考えられる。

5.1.3 重力モデルのパラメータ推定

本研究では、ゾーン*i*から*j*への交通量 X_{ij} は次の修正重力モデルに従うと仮定する。

$$X_{ij} = O_i \frac{D_j^\beta t_{ij}^\gamma}{\sum_j D_j^\beta t_{ij}^\gamma} \quad \dots\dots(5.1)$$

パラメータ β と γ の推定に関して、(1)まず β 、 γ の可能範囲を決める、(2)可能範囲をいくつかに分割し、 β 、 γ のすべての組み合わせを採る、(3) β 、 γ で推定されたOD交通量と実際のOD交通量の誤差を計算する、(4)誤差の最小の β と γ の組み合わせをパラメータの推定値とする。

本研究では、 $\gamma=1.0\sim1.8$ 、 $\beta=0.0\sim1.0$ の範囲において、表5-7のように、 γ は5個、 β は5個の値を採り、その組み合わせ（30通り）について推定を行う。ここで、 $\gamma < 1.0$ の場合を範囲以外とするのは、第3章の目的地選択行動の分析において、 $\gamma \geq 1.0$ があるからである。

表5-7 γ と β の値

γ	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	
β	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

具体的に、次のように推定を行う。

- i) 表5-7の中から β と γ の1つの組み合わせを考える。
- ii) 発生・集中交通量の実測値 O_i 、 D_j を式(5.1)に代入し、OD交通量 X_{ij} を求め、さらに $\sum_j X_{ij}$ によってモデルでの集中交通量を計算する。
- iii) 一般に、集中交通量の実測値 D_j とモデルによって計算された集中交通量 $\sum_j X_{ij}$ は一致しないので、

$$D_j = D_j \frac{D_j}{\sum_i X_{ij}} \quad \dots\dots(5.2)$$

によって D_j を求め、これを D_j の代わりに X_{ij} を新たに計算する(式(5.1))。この操作を

$$|\sum_i X_{ij} - D_j| \leq e \quad (e \text{ は小さい正数})$$

が成立するまで繰り返す。

iv) 最終的に得られたOD交通量から各ゾーンの集中交通量を計算し、それと与えられた集中交通量の誤差を求める。

v) β , γ の値を変え、i)へ戻す。予め定めた β と γ の値のすべての組み合わせの計算が終了すれば、vi)へ進む。

vi) 最小の誤差を与える β , γ を重力モデルのパラメータとし、それらのパラメータを用いてOD交通量を修正し、それを現状ODパターンとする。

表5-7の30通りの組み合わせの域内ノードの集中交通量の実測値と修正値との誤差(標準偏差)を表5-8に示す。この表から $\beta=0.8$, $\gamma=1.0$ の時に平均誤差は最小となっていることが分かった。ここで、 $\gamma < 1.0$ の場合に対して計算していないのは、 $\gamma \geq 1.0$ と設定しているからである。したがって、重力モデルのパラメータは $\beta=0.8$, $\gamma=1.0$ と仮定し、式(5.1)によってOD表を修正した。

表5-8 集中交通量の推計値と実測値の誤差

$\gamma \quad \beta$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1.0	0.161	0.098	0.063	0.040	0.024	0.029
1.2	0.160	0.098	0.063	0.041	0.027	0.029
1.4	0.159	0.098	0.065	0.043	0.030	0.030
1.6	0.158	0.099	0.066	0.045	0.032	0.032
1.8	0.157	0.100	0.068	0.048	0.035	0.034

5.1.4 ODデータの加工

道路網は現実の道路網の主要道路を抽象化したもので、元となるOD調査データもサンプル調査に倍率を与えて求めているものである。両者とも現実との偏差があるので、その両者を用いて交通流の現状を表現するためには何らかの

調整が必要である。その方法としては、(1)1車線あたりの交通容量を変化させることと(2)OD表をある倍率で拡大/縮小することが考えられる。ここで、OD表を拡大/縮小することも1車線あたりの交通容量を予め決める必要がある。本研究では、(1)の方法で分割配分法を用いてOD表を道路網に配分し、さらに現実の交通状態に合うように通過交通を設定ことによって現実の交通状態に接近させる。ここで、「現実の交通状態」の1つの基準としては京都市の道路網における交通状態を考慮して、リンクの混雑度が最大1.5であることを基準とする。もう1つの基準は通過交通に利用されるリンクの混雑度が高いことである。なお、混雑度が最大1.5としたのは、図5-10、図5-11に示すように、混雑度が1.5の時では、走行時間は自由走行時間の20.9倍、1時間の走行距離はわずか2.39キロであり、一般に京都市は通勤時間帯においてそれ以上の混雑状態はないと考えられるからである。

以上の方法によって、本研究では最終的に1車線あたり1600pcu/hとし、通過交通は表5-9のようにリンクの容量から除く。その時のリンク混雑度は図5-12となる。図において、混雑度1.0以上のリンクが10本ある。そのうち、リンク43はダミーノード15の発生交通量によるもので、その他はすべて域内リンクである。域内のリンクの最大のリンク混雑度は1.45である。

全体的な傾向としては、南部および西部の道路は混雑しているが、北部の道

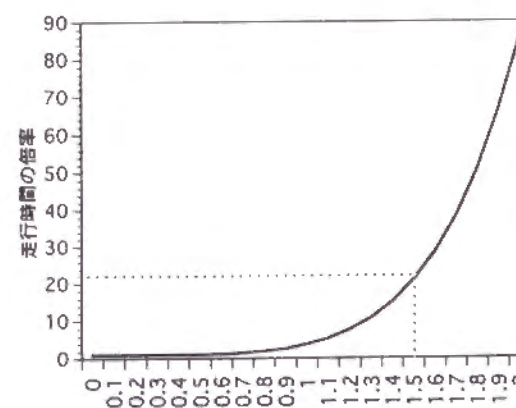


図5-10 混雑度と走行時間の倍率

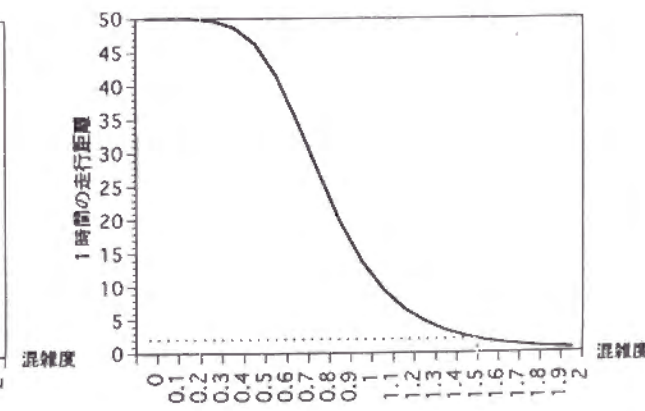


図5-11 混雑度と1時間走行距離

表5-9 通過交通に利用される車線数

リンクナンバー	13, 14	15, 16	17, 18	35, 36
通過交通に利用される車線数	1	4	1	2

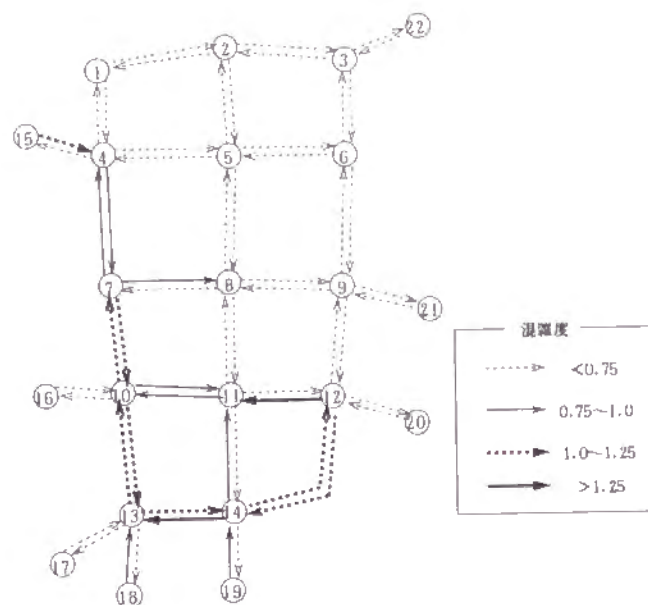


図5-12 現状道路網のリンク混雑度

路には比較的余裕がある。このことより、設定した道路網およびOD表は京都市の道路交通の現状をほぼ再現するものであることが確認できる。

5.2 モデル計算のケース設定

以上で説明した道路網は京都市の現状道路網と呼ぶことにする。京都市の道路網計画によると、南部に都市内高速道路および京滋バイパスを建設する予定がある¹⁾、これらの道路を含めた道路網を将来道路網と呼ぶことにする。高速道路については、現状道路網に新しい高速道路に対応するリンク容量を増強する形で表し、京滋バイパスについては、現状道路網の通過交通を転換させる役

割があるとみて、将来道路網においては通過交通がないように表す(表5-10)。

表5-10 将来道路網の増幅リンク

	増幅リンク (増幅車線数)
都市内 高速道路	2 7(2), 1 7(2), 1 8(2), 1 9(2) 2 0(2), 3 5(2)
京 滋 バイパス	1 3(1), 1 4(1), 1 5(4), 1 6(4) 1 7(1), 1 8(1), 3 5(2), 3 6(2)

5.3では、OD最大化モデルを用いて、京都市の簡略化した現状道路網および将来道路網に対してモデル分析を行う。そしてネットワークとOD交通量の整合性の観点から、土地利用計画に対して考察を加える。具体的には、対象道路網および土地利用規制・誘導条件の違いによって、次の3つのケースについて考察する。

(1) 土地利用制約がなく、ゾーンの土地利用が自由に再配分することができるという理想状態の下で、現状道路網の最大発生交通量およびOD交通量を求め、現状道路網は最大どれだけの交通需要量进行处理できるか、道路網の増強は必要であるか否かを明らかにする。

(2) 将来道路網に対しても、理想状態の下でOD最大化モデルを適用し、土地利用と道路網との整合性の観点から、道路網を有効に利用するために採るべき土地利用分布の方向性について考察する。

(3) 各ゾーンについて開発の規制・誘導を考慮した場合の土地利用分布の適性方法について考察する。

なお、OD最大化モデルを解くことに際しては、(1)と(2)については、ゾーンの土地利用制約条件式 $0 \leq O_i \leq \infty$, $0 \leq D_i \leq \infty$ を、(3)については、京都市の土地利用計画について具体的な土地利用制約条件式を制定し、第3章のOD最大化モデルの式(3.48)に代入し、計算する。具体的な土地利用計画については、5.3.3で述べる。

5.3 土地利用と道路網の整合性の評価

5.3.1 現状道路網

以下では、現状道路網に対してOD最大化モデルを適用し、土地利用制約がなく ($0 \leq O_i \leq \infty$, $0 \leq D_i \leq \infty$), ゾーンの土地利用が自由に再配分することができるという理想状態の下で、現状道路網は最大どれだけの交通需要量を処理できるかを明らかにする。

OD最大化モデルの計算の結果、最大トリップ数は75,852台である。円滑な交通状態、つまり、どのリンクの混雑度も1.0より小さいという場合、理想的なODパターンの下で、道路網全体処理可能な最大トリップ数は75,852台であることが分かる。この交通量は現状の交通量(84,861台)より小さいので、交通渋滞をなくするためには、トータルのトリップ数を削減しなければならない。ところで、トータルのトリップ数の削減は、都市機能のレベルの低下とも考えられ、必ずしも健全な都市運営にとっては好ましくはない。したがって、道路網の交通処理能力を高めるため、道路網リンクを増強し、あわせて交通混雑を引き起こさないように、交通需要の誘導を行わなければならない。

図5-13は各ノードの発生交通量について最適値と現状値を比較するため、それぞれの値を同心円の大きさ(面積)で示したものである。細い線の網掛けの円は現状の発生交通量で、太い線の透明な円は最適発生交通量である。図から分かるように、北部方面のノードでは、最適発生交通量は現状発生交通量より大きく、南部方面ではその逆である。つまり、北部は比較的余裕があるに対して、南部は過密状態になっている。今回のモデル計算では通勤交通を取り上げており、通勤時間帯の発生交通量は、住宅地の立地と関連していると考えられる。現状道路網の効率的利用を促すためには、南部・西部の住宅地開発を抑えて、北部方面を住宅地として発展させるべきとの結果が計算上は得られている。

図5-14は最適集中交通量と現状集中交通量の大きさを同心円(面積)で示したものである。両者がほぼ等しくなっていることから、産業業務立地による集中交通量は最適な分布にあるということが分かる。

図5-15は最大トリップ数が得られたときの道路網におけるボトルネックリンクである。モデル計算は近似計算であるため、混雑度0.95以上のリンクをボトルネックとしている。この図から分かるように、北のノード(1~6)からの発生交通量はリンク22, 40, 18によりさらに増加することが不可能にな

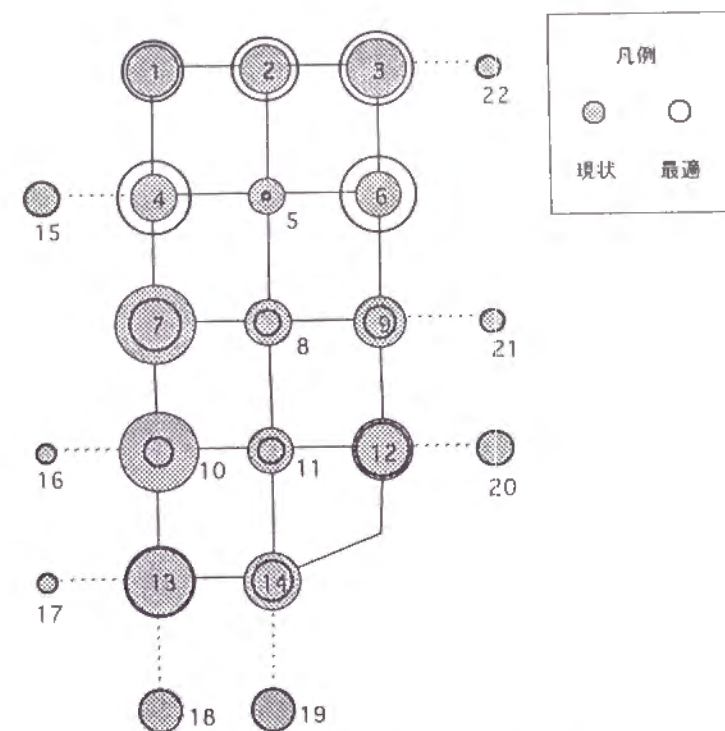


図5-13 現状道路網の最適発生交通量と現状値

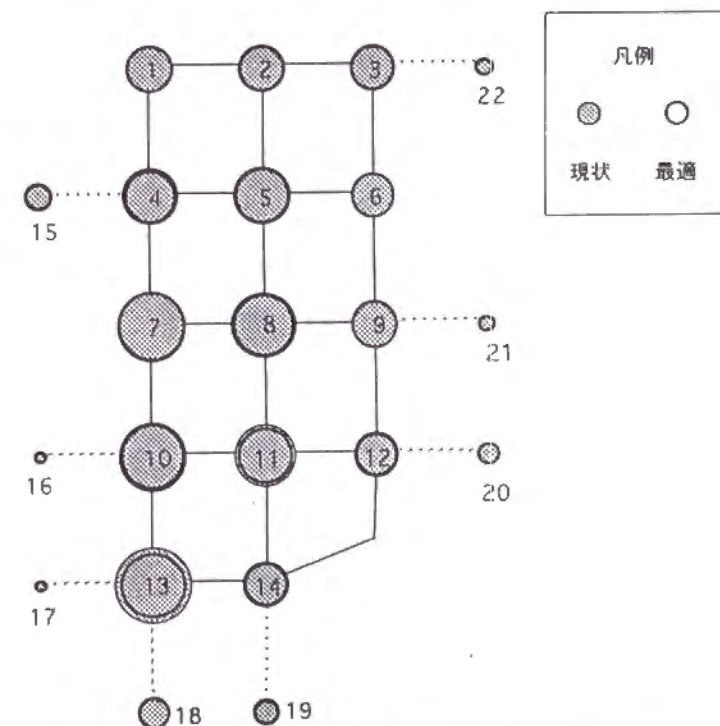


図5-14 現状道路網の最適集中交通量と現状値

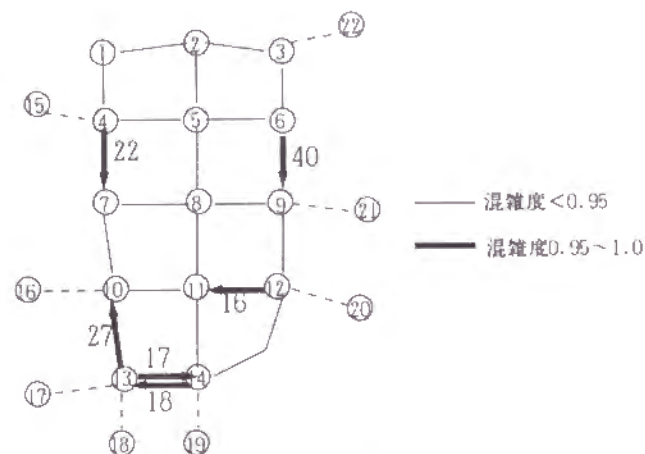


図5-15 現状道路網のボトルネック

り、南のノード（10～15）はリンク16、17、18、27により増加不可能になる。中間のノード7、8、9の発生交通量の増加にはリンク18がボトルネックとなっている。これらのリンク容量の増加によって、対応するノードの発生交通量が増加するので、表5-10に示したリンク容量の増加を施した将来道路網は、各ノード、特にノード7～15の発生交通量を増加させることが可能と考えられ、南部方面の開発は促進、北部は保全という京都市の土地利用計画の基本的方針と一致することが分かる。

また、現状交通量は最大トリップ数の1.12倍であることから、もし現状の交通量を最適なOD分布に誘導することができれば、混雑度が1.0を超えるリンクは図5-15に示す6本だけで、さらに最大のリンク混雑度はわずか1.12であり、現状の道路網混雑状態（図5-12）に比べてかなり緩和されることになる。

5.3.2 将来道路網（土地利用規制がない場合）

土地利用制約がなく（ $0 \leq O_i \leq \infty$ ， $0 \leq D_i \leq \infty$ ），ゾーンの土地利用が自由に再配分することができるという理想状態の前提の下で、将来道路網に対して、交通渋滞のない状況でこの道路網を最効率的に利用できるようなOD交通量をOD最大化モデルで算定し、将来の土地利用誘導方向について述べる。

将来道路網に対してOD最大化モデルを適用した結果、将来道路網の最大トリップ数は111,238台で、現在交通量（84,861台）の1.31倍になっている。つま

り、都市内高速道路や京滋バイパスの建設によって、京都市の交通量が仮に31%増加しても、そのOD分布を適切に誘導すれば、円滑に処理することができる。

図5-16は現在の発生交通量と将来道路網の最適発生交通量を同時に示している。この図から分かるように、ノード4、5、6、12、13において、最適値が現状値よりかなり大きくなっている。したがって、モデル計算の結果に基づけば、これらのゾーンを将来住宅立地の促進地域としていくことが望ましいと考えられる。一方、ノード7、10は現状値が最適値よりかなり大きくなっているため、これらのゾーンの交通の発生量を規制する必要がある。

図5-17は将来道路網の最適集中交通量と現状最適集中交通量を同時に示しているものである。この図から分かるように、都市内高速道路および京滋バイパスが建設されることによって、ほとんどのノードに集中交通量の余裕が生じる。特に都市中心部のノード7～11には比較的大きな余裕量が見られる。したがって、将来道路網に整合させるという観点からは、対象地域内の将来の業務立

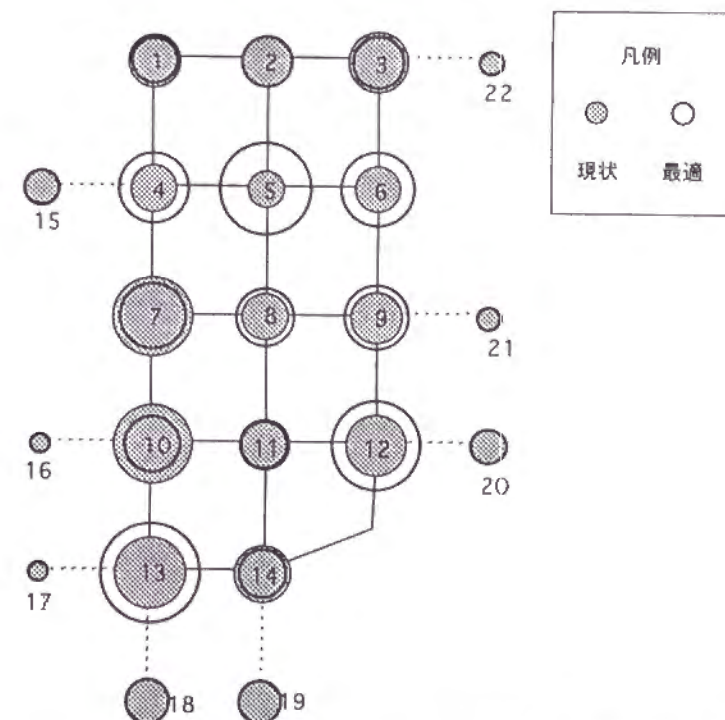


図5-16 将来道路網理想状態での最適発生量と現状発生量

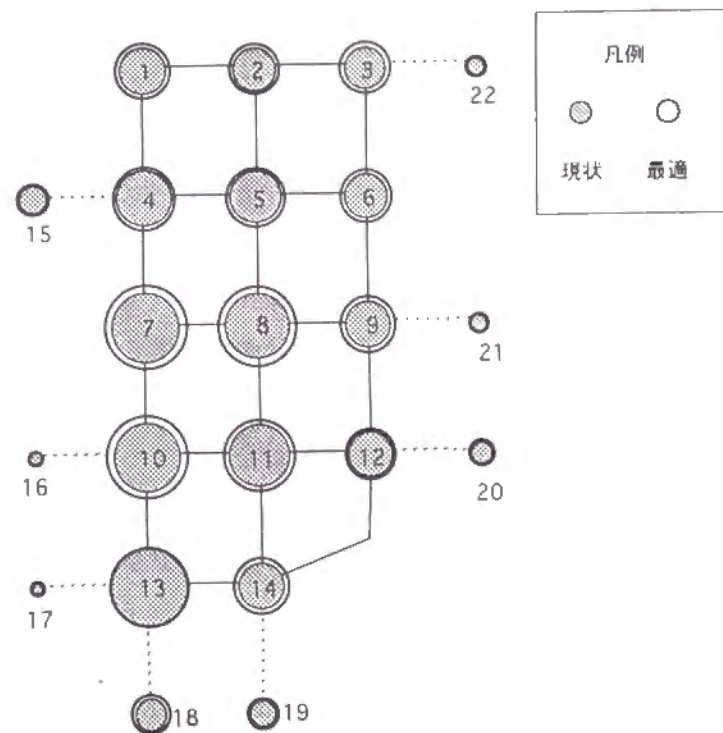


図5-17 将来道路網理想状態での最適集中量と現状集中量

地は都心部を中心として、都心部の外周にも立地するように誘導することが可能である。

以上の数値計算で求めた将来道路網に整合するOD交通量は、単に道路網の有効利用の観点からみたものである。ゾーンによっては、発生・集中交通量、特に発生交通量の大きな調整が必要という結果が示されている。発生・集中交通量はそれぞれ住宅立地や商業・産業立地と大きくかわるものである。そのため、発生・集中交通量の効果的な調整を行うためには、利用モードの転換や流入規制のみでなく、土地利用パターンを積極的に誘導・調整することが必要となる。しかし、現実の土地利用計画は、単に道路網の有効利用を目的として策定されるものではなく、その都市の特性を生かし、健全な運営を行うため、都市の基本構想などの上位計画や現実的な種々の制約条件（土地利用規制）を考慮しなければならない。また、特定のゾーンでは、現時点の土地利用用途を大きく変えることが現実的にはできない場合もある。したがって、土地利用計画変更の実行可能性を考慮し、交通需要と道路網の整合性を保つための研究が

必要である。

5.3.3 将来道路網（土地利用規制がある場合）

京都市の基本計画によると、南部地域は将来の発展地域としている。そのほかの地域、特に北部の地域は風致地域などとして保護されているので、将来的に土地利用面で大きな変化が生じないように、開発の制限がある。これらのことと、上の分析結果から、北部および都心部にあたるノード1～9の将来の発生交通量は現状で抑え、集中交通量は現在の1.0～1.2倍まで増大できると仮定する。ここで、ノードの発生交通量を固定したのは、操作変数の減少による、計算時間短縮をはかるためである。また、都市計画の面からみれば、現状土地利用活動の抑制も望ましくないため、これらのノードの発生・集中交通量の下限値は現状値より大きいと設定する。南部地域は将来的な開発促進の地域であるので、基本的には発生・集中交通量に上限値を設けないが、ノード11は、大規模な交通施設（京都駅）がすでに広い土地面積を占めているに加え、他のゾーン（ノード10、12、13、14）に比べ、面積が狭いので、このノードだけは、発生・集中交通量の上限値を設け、現在の2倍までと仮定する。長期的に見れば、既存の土地利用の用途変更は不可能ではないので、ノード10、12、13、14については発生・集中交通量の下限値も上限値も設けないことにする。

現状発生・集中交通量をそれぞれ O_i' 、 D_i' で表し、最適発生・集中交通量を O_i 、 D_i で表すと、以上の土地利用の制限は次のようになる。

$$\begin{aligned} i = 1 \sim 9: & \quad O_i = O_i' \\ & \quad D_i' \leq D_i \leq 1.2 D_i' \\ i = 10, 12, 13, 14: & \quad 0 \leq O_i \leq \infty \\ & \quad 0 \leq D_i \leq \infty \\ i = 11: & \quad 0 \leq O_i \leq 2.0 O_i' \\ & \quad 0 \leq D_i \leq 2.0 D_i' \end{aligned}$$

このような制約条件をモデルに取り入れて計算した結果、最大トリップ数は99,774台である。現状交通量に比べ18%の増加が可能になっているが、土地利用の制限のない場合の最大トリップ数に比べると、11,464台（111,238－99,774）

小さくなっている。これは、土地利用の制限を取り入れることによって、理想状態のような最適なODパターンが達成できず、道路網の利用効率を犠牲しなければならないからである。

次に、将来最適発生・集中交通量とODデータから集計された現状発生・集中交通量との比較によって、将来土地利用の誘導方向をみる。

図5-18は将来道路網の最適発生交通量と現状発生交通量を同時に示しているものである。ノードの横の数字は両者の差であり、最適値から現状値を引いた値を示している。この図から分かるように、ノード10の発生差は-4,839台で、最適発生交通量は現状発生交通量のほぼ半分になっている。したがって、ノード10の発生交通量の削減を行う必要がある。その他のすべてのノードでは、発生差が正になっている。これらのノードは、北部方面に対して開発保全策を適用した場合、人口増加地域としてふさわしいことが分かる。特にノード12の発生差は7,272台もあるので、再開発等の土地利用の高度利用により、住宅立地を増大させることが可能であることを示している。将来道路網の有効利用の

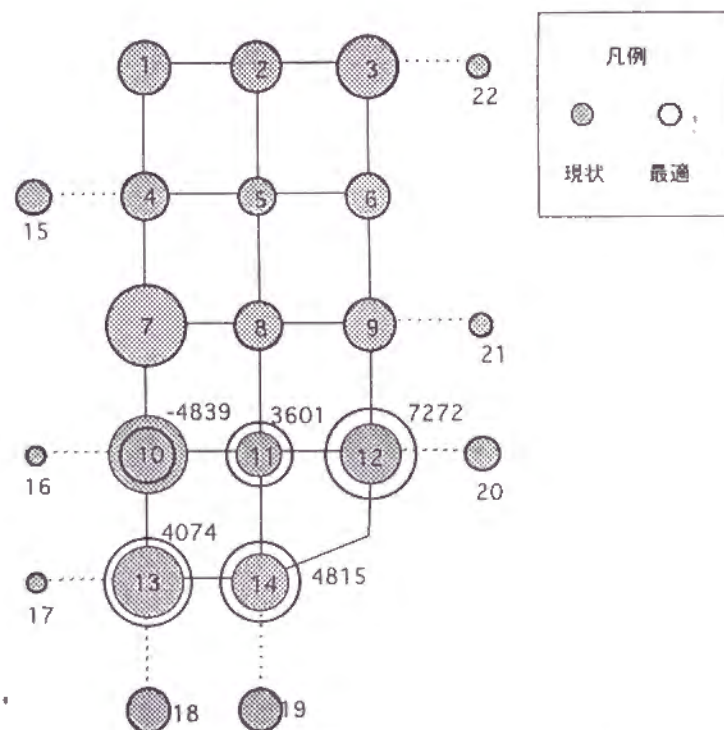


図5-18 将来道路網の最適発生交通量と現状発生量

面からみれば、現在の西南部を住宅地とする立地分布に加えて、東南部および南部にも立地を増加させてもよいということが分かる。

図5-19は将来道路網の最適集中交通量と現状集中交通量を同時に示しているものである。図において、すべてのノードの集中差が正になっている。つまり、都市高速道路および京滋バイパスの延伸によって、いずれのノードにおいても集中交通量の余裕が生じる。特に南部のノード10, 11, 13には大きな余裕が見られる。したがって、将来道路網への整合性という観点からは、京都市の将来の業務立地の増加はこれらのノードを中心として展開できる余地が大きい。このように、規定の道路計画が整備されれば、京都市の将来の業務立地分布は中部・西南部においてまだ開発に余裕があることを示している。

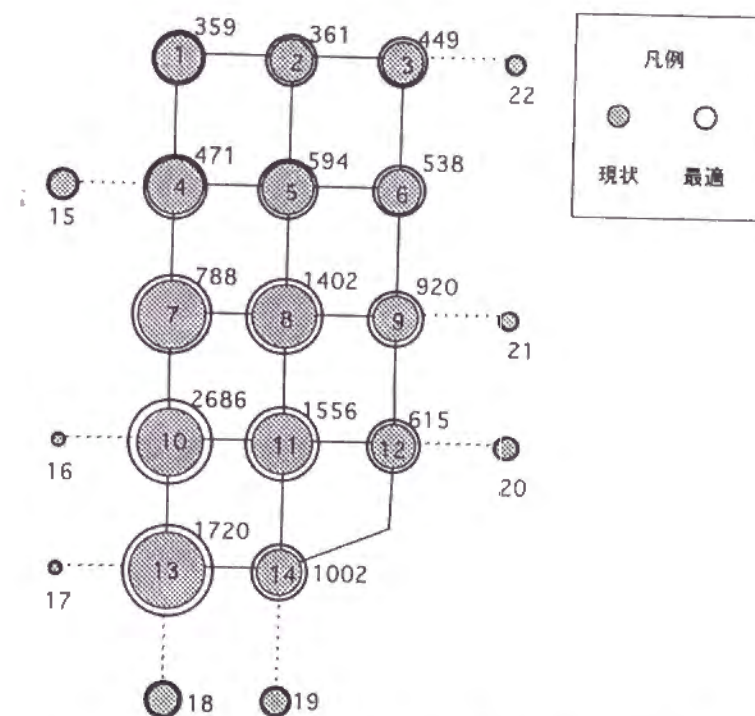


図5-19 将来道路網の最適集中交通量と現状集中量

5.4 結語

本章では、OD最大化モデルの土地利用計画への適用可能性を確認するため、京都市の簡略化した道路網に対して、数値計算を行った。そして、次の成果が得られた。

①交通需要と道路網の整合性を考慮した都市計画の策定のために、OD最大化モデルは有用であることが分かった。

②OD最大化モデルは道路網からの制約だけでなく、土地利用計画の規制条件も取り入れることができるので、土地利用計画の支援モデルとして現実の土地利用計画に応用できると考えられる。

③OD最大化モデルを用いて、次のことを明らかにすることができる。

まず、道路網の最大トリップ数を知ることによって、その道路網が交通需要を満足できるか否か、すなわち道路網の増強が必要であるか否か、さらにどのリンクがボトルネックになっているかということが分かる。

次に、現状のノード発生・集中交通量とモデルから計算される道路網に整合する最適発生・集中交通量と比較することによって、どのノードに交通需要増加の余裕があるか、どのノードにその余裕がないかを知ることができる。さらに、発生・集中交通量が土地利用との対応関係から、その土地利用の誘導方向も分かる。

④京都市の道路網から抽象化した現状道路網と将来道路網について、モデル計算の結果、次のことが分かった。

まず、現状道路網の最大トリップ数が現状の交通需要量より小さいので、道路網のリンク増強の必要性が分かった。さらに、現状道路網のボトルネックが現行の京都市道路網増強計画と一致していることが分かった。

次に、土地利用分布の面から見れば、既存道路網に対しては、北部には土地利用の余裕があるに対して、南部は道路網の交通容量から見れば土地利用は過密の状態になっている。

そして、南部都市高速道路および京滋バイパスの建設によって、現在の西南部を住宅地とする立地分布に加えて、東南部および南部にも立地を増加させてもよいということが分かる。また、将来の業務立地分布は中部・西南部においてまだ開発に余裕があることが示された。

一方、モデルの構造面および実用計算面については、以下の問題点が今後の

課題として残されている。

①OD最大化モデルを応用するには、現実の道路網の構成を明らかにする必要がある。また、このモデルのアルゴリズムは、道路網の規模が大きくなると、計算時間が膨大となる弱点がある。したがって、現実の道路網を如何に抽象化するかは計算結果と直接結びつく。しかし、現時点では、既存道路網を忠実に反映するように抽出する方法はまだ明確されていない。こうして、既存道路網の抽出方法についてもさらに研究する必要があるであろう。

②モデルの計算は道路網の構成だけ知っていればよいのであるが、その結果を用いて、土地利用の誘導方向について説明できるためには、既存ノード発生・集中交通量を必要とする。しかし、実際のODデータと抽象化された道路網を如何にして現実を反映できるかについては操作上はかなり難しい問題である。

③本研究では、通勤時間の発生交通量は住宅地の立地強度、その集中交通量は業務立地の強度としかかわると仮定しているが、具体的に有力の証明はない。また、OD最大化モデルはその立地強度の適正化ができるとしても、具体的な土地利用の説明には限度がある。

参考文献

- 1) 京都市企画調整局(1992): 新京都市基本計画の策定に向けて－現行計画のフォローアップと新計画の策定方針－。

第6章 土地利用との整合性を考慮した 最適道路網計画

6.1 概説

最適道路網計画問題とは、交通システムの状態がある基準に基づいて最適となるように、ネットワークにおけるリンクの構成あるいは付加を選択決定することをいう¹⁾。従来においては、交通量の発生・集中ノードと、その間のOD交通量（またはODパターン）が与えられているとして、最適道路網の構成リンクを探索決定する研究が多く行われている²⁾³⁾⁴⁾。

OD交通量が与えられているということは、道路網の計画時点において、将来のOD交通需要がすでに何らかの方法で知られており、また、道路網が改良されてもその交通需要が変わらないことを意味している。これに対して、佐佐木・朝倉はOD交通量を内生化し、OD交通量一定の条件を緩和したが、やはりノードの発生・集中交通量は事前に与えられる構造になっている⁵⁾。

このように、従来の最適道路網計画モデルは、ある評価基準から見て、先決された土地利用ならびに、それに対応したOD交通需要に最も適合するネットワークのリンク規模を求めることが目的であり、いわば交通需要追随型の交通計画モデルであるといえる。

しかし、同じ道路網に対しても、交通需要のODパターンによって、道路網の処理能力が違ふことは明らかである。交通需要のODパターンと道路網との整合がとれているならば、その道路網が処理可能なトータルの交通需要は増大し、結果的に都市活力を向上させ、土地利用に適合した都市発展につながると考えられる。このため最近では、従来の交通需要追随型の交通政策に対して、長期的な都市運営の視点から、土地利用を道路網に整合させるための交通需要管理策と交通システムの増強などの組み合わせが重視されるようになっている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。

本章では、このような状況を考えて、ノードの発生・集中交通量を内生化した場合の最適道路網計画問題を提案する。すなわち、道路網の円滑な状態で処理可能な最大トリップ数を都市の活力を示す1つの指標と考え、一定の建設費用制約の下で、OD交通量の最大化が達成できる道路網の決定モデルを考える。道路網の構成要素としてはノードとリンクがあるが、この両者を同時に求めるとなると、対象とする問題そのものが不明確になる恐れがあることから、本研究では既存道路網のリンク増強計画に限定して検討する。目的関数は道路網において処理可能なトリップ数の最大化とする。操作変数はリンクの増強規模と各ノードの発生・集中交通量である。

以下では、道路網で処理可能な最大トリップ数を求めるOD最大化モデル（第3章）を用いて、最適道路網計画問題を定式化し、現実京都市の道路網を対象として数値計算例を行い、道路網を有効利用するための道路網計画と土地利用の誘導方向を考察する。

6.2 最適道路網計画のモデル

6.2.1 モデルの定式化

これまでの最適道路網計画手法を見てみると、計画変数（リンク規模）の数学的特性によって、離散変数か連続変数かの2種類に分類できる。本研究では、リンク増強規模を離散変数とした場合の最適道路網計画手法を用いて、道路網の処理可能なトリップ数が最大になるようにリンクを付加し、道路網を構成する手法を提案する。この場合の最適道路網計画問題は、第3章のOD最大化モデルの中に、リンク拡幅の可否を説明変数として建設費の予算制約を加えればよい。このとき、リンクの建設費が、その長さに比例すると仮定すれば、予算制約は道路網の増強リンクの総延長の制約に置き換えられる。こうして、最適道路網計画問題は次のように定式化することができる。

上位問題

$$\text{Max : } \sum_{i \in I} O_i \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

Subject to :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} O_i h_{ij} p_{ij}^a \leq \mu_a C_a \quad a \in A \quad \dots\dots(6.2)$$

$$D_j = \sum_{i \in I} O_i h_{ij} \quad j \in J \quad \dots\dots(6.3)$$

$$O_i^L \leq O_i \leq O_i^U, D_j^L \leq D_j \leq D_j^U \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots(6.4)$$

$$\sum l_a x_a \leq L, \quad a \in A \quad \dots\dots(6.5)$$

$$x_a = 0 \text{ or } 1 \quad \dots\dots(6.6)$$

下位問題

$$h_{ij} = \frac{D_j^a R_{ij}^{-r}}{\sum_j D_j^a R_{ij}^{-r}} \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots(6.7)$$

$$\text{Min} \quad \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx \quad \dots\dots(6.8)$$

Subject to :

$$v_a = \sum_{k \in K_{ij}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} U_{ij}^k \delta_{akij}, \quad a \in A \quad \dots\dots(6.9)$$

$$\sum_{k \in K_{ij}} U_{ij}^k = O_i h_{ij} \quad i \in I, j \in J \quad \dots\dots(6.10)$$

$$U_{ij}^k \geq 0 \quad i \in I, j \in J, k \in K_{ij} \quad \dots\dots(6.11)$$

ここに,

O_i : ゾーン i の発生交通量

h_{ij} : 発ゾーン i から見た着ゾーン j の選択確率, $\sum_{j \in J} h_{ij} = 1.0$

p_{ij}^a : ゾーン i からゾーン j への OD 交通がリンク a を利用する確率

μ_a : リンク a の許容混雑度

C_a : リンク a の交通容量

D_j : ゾーン j の集中交通量

O_i^U : ゾーン i の発生交通量の上限值

D_j^U : ゾーン j の集中交通量の上限值

O_i^L : ゾーン i の発生交通量の下限值

D_j^L : ゾーン j の集中交通量の下限值

R_{ij} : ゾーン i, j 間の距離

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_a, \dots)$$

: 道路網構成を表し, リンク a が道路網に含まれないとき $x_a = 0$, 道路網に含まれるとき $x_a = 1$ とする.

l_a : リンク a の長さ

L : 増強リンクの総延長

v_a : リンク a の交通量

$t_a(\cdot)$: リンク a の走行時間関数

U_{ij}^k : OD ペア i-j 間の k 番目経路の OD 交通量

δ_{akij} : OD ペア i-j 間の k 番目経路がリンク a を経由するとき 1, そうでなければ 0

I : 発ノードの集合

J : 着ノードの集合

A : リンクの集合

K_{ij} : OD ペア間の利用可能経路の集合

以上の定式化において, 式(6.5), (6.6)を除けば, OD 最大化モデル (式(3.45)~(3.53)) そのものになる. 式(6.5)は増強リンクの総延長の制約式で, 式(6.6)はリンク増強の採否の決定変数である.

6.2.2 計算方法

以上の定式化は, OD 交通量の最大化を目的とするリンク増強の最適化問題として解釈できる. このモデルでは, リンク増強の採否を決定変数としているので, 整数計画問題となる. 各リンクごとに解のネットワークに採用されるか否かであるので, リンクが n 本の場合は 2^n 個の組み合わせとなる. これらの組み合わせの中から増強リンクの総長が制約値以下で, 処理可能の交通量が最大となるものを選び出せば最適解となる. 本研究での最適道路網計画問題において, 目的関数は対象道路網の処理可能な最大トリップ数であり, 従来の最適道路網計画の基本問題である Hoang²⁾と Scott²⁾の問題と比べてみると, 目的関数は違うが, 問題の構造は同じである. したがって, そのアルゴリズムが応用できる.

しかし、厳密解を求めるためには膨大な組み合わせについて目的関数を検討する必要があり、リンク数の増加につれて組み合わせの数が急増するために、従来において、多くの近似解法が提案されている¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。特に本研究での最適道路網計画問題においては、道路網の規模の増加につれて、組み合わせの数とともにOD最大化モデルの計算時間も激増するので、便宜的に近似解法を用いることにする。ここで、最短生成木から出発し、目的関数の最大増加をもたらすリンクをネットワークにつけ加える操作を実行可能な限り繰り返すScottのforward法²⁾を用いる。アルゴリズムは次のとおりである。

- Step 1 現状道路網を初期道路網NET(0)とする。
- Step 2 道路網NET(N)について最大トリップ数および最大トリップ数が得られた時のボトルネックとなるリンクを求める。このとき、最大トリップ数は $T^{(N)}$ とし、ボトルネックリンクは合わせて $M^{(N)}$ 本あるとする。このステップまでのリンク増強費用は l_N とする。
- Step 3 NET(N)の $M^{(N)}$ 本のボトルネックリンクを1カ所ずつ1車線拡大した道路網をNET(N,1), NET(N,2), ..., NET(N,a), ..., NET(N, $M^{(N)}$)とする。道路網NET(N,a)全体のリンク増強費用 $l_{NET(N,a)}$ はNET(N)のリンク増強費用 l_N にリンクaの建設費用 l_a を足したものになる。
- Step 4 リンク増強費用制約以内の道路網、すなわち $l_{NET(N,a)} \leq L$ の道路網を選出し、それ以外の道路網を棄却する。もしすべての道路網が棄却されたら、Step 7へ。1つでも残っているなら、Step 5へ。
- Step 5 Step 4で選出された道路網に対してそれぞれの最大トリップ数 $T(N,a)$ 、そして、最大トリップ数の増量 $(T(N,a) - T^{(N)})$ とそのボトルネックリンク1車線の増強費用 (l_a) の比を取って投資効果 $E(N,a)$ を求める。その中、投資効果 $E(N,i)$ を最大にする道路網NET(N,A)を見つけ、次ステップの計画道路網とする。
- Step 6 道路網NET(N,A)をNET(N)、 $N=N+1$ として、Step 3へ。
- Step 7 NET(N)を最適道路網に決定する。NET(N)の最大交通量および最適発生・集中交通量を出力する。計算を終わる。

ここで、最大トリップ数を求められたときのボトルネックリンク以外のリンクの増強効果を見ないのは、ボトルネックリンク以外のリンクが増強しても最

大トリップ数の増大に効果がないからである。

6.3 京都市道路網への適用

本節では、上述の最適道路網計画モデルを用いて、京都市道路網への応用を試みる。

6.3.1 対象道路網と必要データ

以上の最適道路網計画モデルはOD最大化モデルに整数計画を加えた形で定義されているので、OD最大化モデルに必要なデータと整数計画に必要なデータをインプットすればよい。整数計画に必要なデータは各リンク1車線の建設費用（リンクの建設費がその長さに比例すると仮定した場合はリンク長）および総建設費用（増強リンクの総延長）である。OD最大化モデルに必要なインプットデータは道路網の要素（ノード、リンク）、リンク容量、リンク許容混雑度 μ_a 、リンク走行時間関数、ノードの発生・集中交通量の許容範囲および重力モデルのパラメータ β 、 γ である。

モデル計算の対象道路網およびリンク容量、リンク許容混雑度、走行時間関数、重力モデルのパラメータは β 、 γ は第5章と同様し、ここでは省略する。将来の道路網計画および土地利用計画に現実的な結果を求めるために、ノードの発生・集中交通量の制約条件式は土地利用規制がある場合と同じように設定する。すなわち、

$$\begin{aligned} i = 1 \sim 9: & \quad O_i = O_i' \\ & \quad D_i' \leq D_i \leq 1.2 D_i' \\ i = 10, 12, 13, 14: & \quad 0 \leq O_i \leq \infty \\ & \quad 0 \leq D_i \leq \infty \\ i = 11: & \quad 0 \leq O_i \leq 2.0 O_i' \\ & \quad 0 \leq D_i \leq 2.0 D_i' \end{aligned}$$

ただし i はノード番号である。

また、簡単のため、1車線のリンク増強の建設費用はその長さに比例すると仮定する。また、2車線の増強費用は1車線の2倍とする。リンク長は第5章

の表5.3で示したとおりである。増強リンクの総延長を1車線リンクの総延長で表すと、京都市の将来道路網計画を参考にして、京都市道路網のリンク増強の総延長は14kmとする¹⁹⁾。

6.3.2 最適道路網計画

まず現状道路網に対してOD最大化モデルを用いてボトルネックリンクを求める。そのとき、最大トリップ数は74,791台で、ボトルネックとなるリンクはリンク17、18、19、27の4本である。各ボトルネックリンクをそれぞれ1車線拡幅した道路網に対して最大トリップ数を求め、その投資効果を表6-1で示す。この表から、リンク18の投資効果が最も大きいことが分かる。したがって、この道路網では、まずリンク18を1車線拡幅するのが良い。

リンク18を1車線拡幅する建設費用は1.56kmであり、建設費用制約14kmより小さいので、次のステップ1ではリンク18を拡幅した道路網NET(1)について、さらに上の作業を繰り返す。表6-2に示すように、同様に全部で8ステップの計算を行う。各ステップの増強リンクの建設費用および最大トリップ数は図6-1のようになる。ステップ8の道路網増強建設費用は13.52kmになり、予算(14km)の範囲内であるが、さらにそのボトルネックリンクのいずれかを1車線増強しても、建設費用の制約を超過するので、作業を終える。このようにして、表6-2の網掛けの部分で示したように、最適道路網の計算結果は現在道路網に6カ所のリンクを拡幅増強したものとなった。

表6-1 現状道路網のボトルネックリンクの増強効果

付加リンク	増強費用 (リンク長)	最大 交通量	最大交通 量増値	投資効果 (台/m)
17	1560m	75639台	848台	0.186
18	1560m	76723台	1932台	1.238
19	2558m	75094台	303台	0.118
27	1810m	76200台	1409台	0.778

表6-2 ボトルネックリンクと増強リンク

STEP	道路網	拡幅 リンク	ボトルネックと投資効率感 度最大のリンク(網掛け)
0	現状	—	17, 18, 19, 27
1	NET(1)	18	16, 18, 19, 20, 27, 35
2	NET(2)	27	16, 17, 18, 19, 20, 27, 35
3	NET(3)	17	16, 18, 19, 20, 27, 35
4	NET(4)	35	16, 18, 19, 20, 27
5	NET(5)	27	13, 16, 17, 18, 19, 25, 27, 28
6	NET(6)	17	13, 16, 18, 19, 20, 25, 27, 35
7	NET(7)	25	13, 16, 18, 19, 20, 28, 35
8	NET(8)	13	16, 17, 18, 19, 20, 27, 28, 35

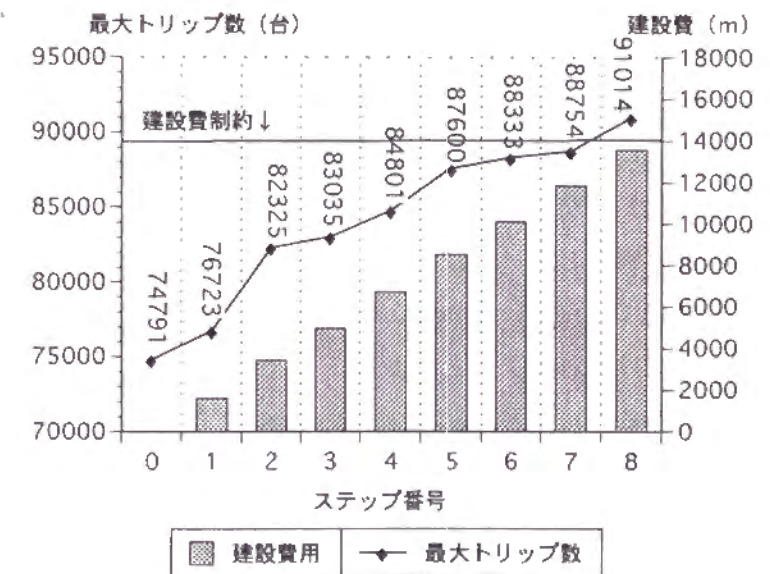


図6-1 各ステップの増強費用および最大トリップ数

6.3.3 最適発生・集中交通量からみた土地利用誘導方法

長期的観点から土地利用の規制・誘導によりOD交通需要を道路網と整合さ

せることが計画課題として重要になってきている。以下では、上の計算例で求められた最適発生・集中交通量と既存発生・集中交通量の差（ここでは、発生量差・集中量差と呼ぶ）から、道路網全体としてどれだけの交通量の余裕が生じたか、また最適道路網を有効利用のために、各ゾーンにはどれだけの立地余裕があるかについて交通量をベースとして議論する。ここで、発生量差あるいは集中量差が正である場合は立地余裕があることを意味し、負である場合は制限することを意味する。なお、この計算例では、朝の通勤交通を対象としているので、発生交通量は住宅立地、集中交通量は業務立地と関連すると考えられる。

図6-1に示すように、最適道路網の最大トリップ数は91,014台である。現状道路網のOD交通量は84,861台であることから、リンク容量増強によって、円滑な交通状態のもとで、道路網全体の交通量がさらに7%を増やすことができるということが分かる。

図6-2はノードの発生量差と集中量差を示している。本研究では、ノード10～14以外のノードの発生交通量は現在と変わらないと仮定しているので、これらのノードの発生量差は0となっている。

まず発生量差をみると、ノード10、12、14は負になっていることから、これらのノードにおける住宅立地を制限する必要があると考えられる。特にノード12は現状発生交通量と最適発生交通量との差が大きいので、発生交通量の抑制を厳しく実行しなければならないことを示している。ノード11と13の発生量差が正になっているので、将来の住宅立地として余裕があり、今後の立地の増大を受け入れてよいといえる。

集中量差をみると、ほとんどのノードにおいて正になっている。したがって、リンクの拡幅によって、ほとんどのノードにおいて、業務立地の増大が可能である。その中で、集中量差が相対的に大きいノードはノード7、8、10、12、14である。したがって、これらのゾーンにおいては、業務立地にまだかなり余裕があることを示している。ノード7、8は京都市の都心部に位置しているが、これらのノードの集中量差が正であることは、都市高速道路などの南部における道路網の拡幅増強が行われると、まだ業務立地の増大が可能であることを示している。

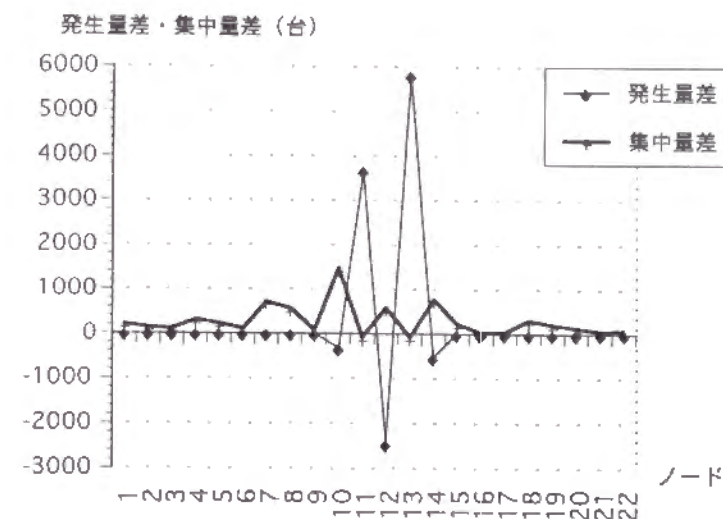


図6-2 ノードの発生量差・集中量差

6.4 結語

本章では、ノード発生・集中交通量を内生化した道路網の最適計画方法を提示し、京都市の道路網を対象例として最適計画を行った。主な成果は以下のようまとめられる。

- ①従来の最適道路網計画モデルはOD間の交通量が与えられているとして、最適道路網の構成リンクを探索決定する研究がほとんどである。その欠点として、先決された土地利用（OD交通量）に最も適合する道路網のリンク規模を求めることになり、交通需要追随型の交通モデルである。土地利用との整合性をも考慮するためには、ノードの発生・集中交通量を内生化する必要がある。本章で提案した最適道路網計画モデルはノードの発生・集中交通量を内生化したOD最大化モデルを道路網の最適計画モデルに結合させた形で定式化されているので、このモデルを用いて、一定の建設費用の下で最大のトリップ数を円滑に処理できる道路網の構成および土地利用の誘導方向を明らかにすることができる。

- ②京都市の道路網で簡単な計算例を行い、道路網計画との関係で土地利用に

もとづいた将来交通需要管理の方向づけが検討できることを示し、実用的にも適用可能な見通しが得られた。

本章では、既存道路網の改良における最適計画問題を取り上げている。新設道路網の計画については、さらに付加可能なリンクの組み合わせが増えるので、さらに効率的な計算方法が必要であろう。また、本章で提案した最適道路網計画モデルは2レベル最適化問題の解法にも直接関係するので、2レベル最適化問題の解法の効率化も必要であろう。

参考文献

- 1) 土木学会土木計画学研究委員会(1987), 土木計画学講習会テキスト, 交通ネットワークの分析と計画: 最新の理論と応用, pp. 138-139.
- 2) Scott, A. J. (1969): The optimal network design problem: some computational procedures, *Transportation Research*, Vol. 3, pp. 201-210.
- 3) Steenbrink, P. A. (1974): Transport network optimization in the Dutch integral transportation study, *Transportation Research*, Vol. 8, pp. 11-27.
- 4) Harker P. T. & Friesz T. L. (1984), Bounding the solution of the continuous equilibrium network design problem, *Proc. of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory in Delft*, VNU Science Press, pp. 233-252.
- 5) 佐佐木綱・朝倉康夫(1987): OD需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル, 土木学会論文集, 第383号/IV-7, pp. 93-102.
- 6) Wachs M. (1990): Regulating traffic by controlling land use - the Southern California experience, *Transportation* 16, pp. 241-256.
- 7) Institute of Transportation Engineers(1989): A Toolbox for

Alleviating Traffic Congestion, ITE.

- 8) 太田勝敏(1992): 交通需要マネージメントの概念と展開 - 米国の事例を中心として -, 道路交通経済, No. 4, pp. 12-21.
- 9) Hoang, H. H. (1973): A computational approach to the selection of an optimal network, *Management Science*, Vol. 15, No. 5, pp. 488-498.
- 10) 飯田恭敬(1975): 最適道路ネットワークの構成手法, 土木学会論文報告集, 第241号, pp. 135-144.
- 11) Dionne, R. & Florian, M. (1979): Exact and approximate algorithms for optimal network design, *Networks*, Vol. 9, No. 1, pp. 37-59.
- 12) 枝村俊郎・森津秀夫(1977): 最適交通ネットワーク問題の厳密解法と近似解法, 土木学会論文報告集, 第262号, pp. 113-127.
- 13) 京都市企画調整局(1992), 新京都市基本計画の策定に向けて - 現行計画のフォローアップと新計画の策定方針 -.

第7章 結論

戦後、アメリカをはじめとする欧米諸国・日本の交通政策は3つの段階に分けられる。第1段階である40年代後半からの30年間は経済発展、都市化、自動車の普及を促進するため、高速道路や交通施設などの建設に重点がおかれていた。第2段階では、交通需要を予測し、それを満足できるように交通計画を立案し、施設整備を行っていた。しかし、第3段階に入った近年では、財政問題や環境問題などの深刻化に伴い、道路や交通施設をさらに新設・増強することが次第に困難になりつつある。このような状況の下で、都市ならびに交通の計画主体は中長期的に土地利用を道路網に整合させ、交通需要をマネジメントすることによって、交通混雑を緩和しつつ、一定レベル以上の都市活動の可能性を確保することを目指す考え方が重視されるようになり、交通需要マネジメントは新たな計画概念として確立されつつある。

最近では、成長管理策や自動車流入制限ゾーンなど、多くの交通需要管理策が報告されているが、ほとんどが政策の報告にとどまっております¹。交通需要管理策の設定において、その施策内容を定量的分析に基づき、決定する方法論は未だ提案されていない。実効性の高い交通需要管理策を実施するためには、各種代替案の効果を予測し、評価を下すための技術的な方法論の整備が不十分である。

このような背景をふまえ、本研究では、土地利用を道路網に整合させることを目指した交通需要管理策ならびに交通システムの増強策を計画・立案するためのひとつの方法論を提案する。交通需要のODパターンと道路網との整合がとれているならば、その道路網が処理可能なトータルの交通需要は他の場合と比べて多くなり、結果的に都市活力を向上させ、道路網に適合した都市発展につながると考えられる。道路網が処理可能な最大トリップ数および最適なODパターンを導出するOD最大化モデルを提案し、土地利用計画および道路網計画に適用することが本研究の主な内容となっている。

各章ごとに得られた成果をまとめると、以下の通りである。

第2章では、土地利用と道路網の整合性の概念を導入し、そして類似の概念を導入した従来の研究を整理した上で、本研究の特色について説明した。土地利用と交通ネットワークの整合状態は、土地利用から生起される交通需要量と交通施設と最もバランスがとれている望ましい状態をいう。土地利用と道路網の整合性の研究は、土地利用／交通モデルを用いて行われるが、従来の土地利用／交通モデルのうち、最適化モデルのひとつに位置づけられる。これらのモデルでは、いずれもOD交通分布（あるいはODパターン）が与えられることを前提としている。しかし、OD分布が所与であることは、交通網の整備、改良が実行されても、あらかじめ与えられたOD分布パターンは変化しない、換言すれば、対象地域内のゾーン間の相対的な結びつきの強さは変わらないと仮定していることに他ならない。つまり、交通需要成長管理や自動車流入制限ゾーンなどの交通需要管理策によって交通需要の分布を適正し、交通問題を緩和できることを考慮しないことになる。したがって、交通需要マネジメントも考えなければならない今日の都市計画に対して、これらのモデルは不十分である。上記の検討をふまえ、土地利用の規制・誘導をも含めた中長期的な土地利用計画および道路網計画の支援モデルを提案することを本研究の主要な研究目的として位置づけられた。

第3章では、道路網が与えられた場合、それに整合するOD交通量および最大トリップ数を求めるOD最大化モデルを提案した。このモデルは、従来のODパターン一定とした道路網容量問題と違って、道路網を最も効率的に利用するため、交通需要パターン（ODパターン）も内生的に求められる問題となっている。この最適OD交通量を現実の交通需要管理策の指針として利用可能とするためには、計画主体の目的と交通行動者の行動ルールを明示した上で両者の関係をモデルの中に取り込まなければならない。提案したOD最大化モデルは、計画主体の目的を代表する上位問題と利用者の交通行動を代表する下位問題からなる2レベル最適化問題として構築される。利用者の交通行動として重要な目的地選択行動、経路選択行動についての取り扱い方を仮定した後、OD最大化モデルの定式化を行い、さらにその解法などについて述べた。提案した

モデルは、制約条件が非線形でかつ陽でないため、その解法としては、コンプレックス法を用いた。

第4章では、OD最大化モデルを用いて、格子型、格子放射型、格子環状型の3つの道路網形状について、リンク容量パターンの違いによる道路網最大トリップ数の変化を比較分析し、また各道路網形状を効率的に利用できるようなOD交通量を明らかにし、次のような結論を得た。

- 1) 最適なリンク容量パターンを採用すれば、どのような道路網形状でも大差のない投資効率が見られる。つまり、投資効率から見れば絶対的に優位な道路網形状は存在しない。
- 2) 格子型と格子放射型は内部高密度のリンク容量パターンが効率的であるのに対して、格子環状型は均等なリンク容量パターンが効率的である。
- 3) 格子型は投資効率が高く、その安定性もあるが、平均所要時間が長いことが欠点である。格子環状型は平均所要時間は短い、高い投資効率が見られるのは限られた狭い範囲のリンク容量パターンに対してのみである。これらに対して、格子放射型は投資効率の安定性も高いし、平均所要時間も短いので、計画主体と利用者の両者から見て、望ましい道路網形状といえそうである。
- 4) 発生交通量の分布から見ると、3種類の道路網形状はともに中心部高密度の分布が適合するが、格子環状型はさらに中心部高密度型の分布となる。
- 5) 集中交通量の分布から見れば、格子放射型は格子型と同様に中心部から周辺部へと漸減する分布が良いのに対して、格子環状型は中間ノードで高密度分布となる。

第5章では、OD最大化モデルの現実の土地利用計画への適用可能性を確認するため、京都市の道路網を簡略化したネットワークについて、数値計算を行った。道路網が所与の場合に、そのネットワークとOD交通量の整合性を保つという観点から、土地利用計画に対して検討を加えた。その結果、以下の知見を得ている。

- 1) 交通需要と道路網の整合性を考慮した都市計画の策定のために、OD最大化モデルは有用であることが分かった。
- 2) OD最大化モデルは道路網からの制約だけでなく、土地利用計画の規制・

誘導等の条件も取り入れることができるので、土地利用計画の支援モデルとして現実の土地利用計画に応用できると考えられる。

- 3) OD最大化モデルを用いて、道路網の最大トリップ数を知ることによって、その道路網が交通需要を満足できるか否か、すなわち道路網の増強が必要であるか否か、さらにどのリンクがボトルネックになっているかということが分かる。また、現状のノード発生・集中交通量とモデルから計算される道路網に整合する最適発生・集中交通量と比較することによって、どのノードに交通需要増加の余裕があるか、どのノードにその余裕がないかを知ることができる。さらに、発生・集中交通量が土地利用との対応関係から、その土地利用の誘導方向も分かる。

第6章では、土地利用との整合性を考慮した場合の最適道路網計画問題について検討した。すなわち、道路網の円滑な状態で処理可能な最大トリップ数を都市の活力を示す1つの指標と考え、一定の建設費用制約の下で、OD交通量の最大化が達成できる道路網の決定モデルを考える。これはOD最大化モデルと従来の道路網の最適計画モデルとを結合した構造となっている。第5章と同様に、京都市の道路網で簡単な計算例を行い、都市活力の増進を目指した包括的な土地利用計画・道路網計画の立案を支援することができることを示し、実用的にも適用可能な見通しが得られた。

本研究では、主に次の点で、土地利用計画ならびに交通計画に対して、一定の貢献があると考えられる。

- 1) 従来の交通需要追従型の土地利用／交通モデルに対して、交通需要マネジメントを取り入れる考え方は今後モデル開発の傾向であることを指摘した。
- 2) 与えられた道路網に整合するようなOD交通量を求めるOD最大化モデルを提案した。このモデルを用いて、交通需要管理、特に土地利用の成長管理や自動車流入制限ゾーンの量的な指針を与えることができる。
- 3) 一般的な道路網形状（格子型、格子放射型、格子環状型）に対して、どのような道路網の構成でどのような土地利用パターンの方が全体的にバランスがとれていて、渋滞が引き起こされにくいということを明らかにした。
- 4) 一定の建設費用が与えられ、既存道路網の増強を行う場合、最大の交通増

加を処理可能な道路網の増強方法、すなわち土地利用計画を同時に考える最適道路網計画を提案し、その実用性を示した。

全体的に言えば、交通需要マネジメントを支援するモデルはまだ未開発の状態である。その枠組みの構築や具体的なモデルの推定や実証研究などはもちろん、その試みである本研究だけからみても、今後の研究課題として、次の点が残されている。

- 1) 本研究では、OD最大化モデルを基本的なモデルとして、上述の研究を行ったが、このモデルの定式化において、重力モデル式の交通需要関数はODペア間の交通量は、距離と目的地の吸引力によるものと仮定した。しかし、現実では、距離よりも走行時間の影響が強いと思われる。走行時間を交通需要関数に取り込んでモデルを改良することが必要であろう。
- 2) OD最大化モデルは2レベル最適化問題として定式化されている。本研究では、モデルの開発・応用に重点を置き、計算アルゴリズムは従来用いられてきたコンプレックス法を用いた。しかし、このアルゴリズムは、道路網の規模が大きくなると、計算時間が急増し、場合によっては最適解を得られない場合もある。さらに大規模な道路網に応用し、より具体的な計画に応用するためには、効率的で精度の高いアルゴリズムの開発に力を入れるべきであろう。
- 3) 一般的な道路網形状の整合性の比較において、抽象化した道路網条件と単純な交通需要関数にもとづいてモデル計算を行ったので、その結論として必ずしも一般性を有するとは言えない面がある。また、現実の道路網計画と土地利用計画に適用するためには、さらに具体的に詳細な検討をする必要があるだろう。
- 4) 本研究では、通勤時間の発生交通量は住宅地の立地強度、その集中交通量は業務立地の強度とかかわると仮定しているが、具体的にどのような関係にあるかについては研究していない。OD最大化モデルから求められたゾーンの適正立地強度を用いて、現実のきめ細かな土地利用の誘導に適用するにはさらに研究する必要があるであろう。